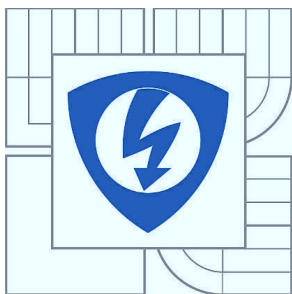


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH OPTICKÉ BEZKABELOVÉ LINKY MALÉHO DOSAHU

SHORT PATH OPTICAL WIRELESS LINK DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

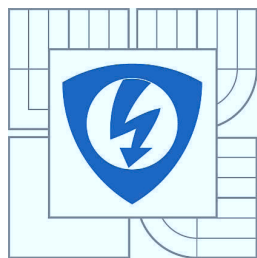
Bc. ONDŘEJ KOVÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN DIBLÍK

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Ondřej Kovář

ID: 72958

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh optické bezkabelové linky malého dosahu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se obecně s optickými bezkabelovými spoji, jejich komponenty a jevy, které budou ovlivňovat jejich funkčnost. Zaměřte se na komponenty klíčové pro linky malého dosahu (použití v místnostech) a to jak směrové, tak nesměrové linky.

Navrhněte jednoduchý optický spoj s intenzitní modulací ON/OFF keying. Zvolte vhodné optické komponenty.

Realizujte navržený optický spoj malého dosahu a ověřte jeho funkčnost. Zpracujte technickou dokumentaci k danému optickému spoji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998.

[2] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley, 1991.

[3] SMITH, F. G., KING, T. A., WILKINS, D. Optics and Photonics. New York: John Wiley, 2007.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Diblík

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje návrhu a výrobě optického bezdrátového spoje zamýšleného pro použití uvnitř budov. Nejprve jsou analyzována frekvenční spektra infračerveného, viditelného a ultrafialového světla z pohledu svých typických vlastností, jako jsou například hodnoty útlumů nebo schopnost odrazivosti. Na základě těchto analýz jsou vybrány vhodné vlnové délky, na kterých bude spoj realizován. Následující část je věnována výběru vhodných komunikačních komponent na základě jejich deklarovaných vlastností. Tyto vlastnosti jsou v nadcházející kapitole proměřeny a výsledky jsou porovnány s hodnotami udávanými výrobcem. Další část se věnuje problematice návrhu schémat modulů transceiverů. Po dokončení softwarových návrhů je popsána výroba desky plošných spojů, osazení komponenty a rozboru jejich rozložení. Poslední část této diplomové práce se zabývá testováním vyrobeného prototypu z hlediska maximálních přenosových vzdáleností a pracovních frekvencí. Na konci je zveřejněna kapitola zabývající se možnostmi vylepšení navrhovaného systému na základě zkušeností získaných měření.

Klíčová slova

Bezdrátový optický bezdrátový spoj, VLC, optická komunikace, LED, fotodioda, infračervené spektrum, UV spektrum, viditelné spektrum

Abstract

This diploma thesis is focused on design and prototyping of wireless optical link for an indoor usage. In the beginning of the thesis frequency spectrums of infrared, visible and ultraviolet light are described by its typical qualities such as values of attenuation or reflection capability. On the basis of this analysis, a proper wavelength has been chosen for usage at the engineered communication system. Next part is devoted to selection of suitable communication components on basis of its declared qualities. In the following chapter this qualities are in carefully measured and after that they are compared with values provided by its manufacturer. The following section is devoted to design schemes of transceiver modules. After completion of the design the manufacturing of PCB, mounting components and the analysis of their distribution was described. The last part of this thesis deals with testing of created prototype in terms of maximum transmission distances and operating frequencies. At the very end of this project, in one small section ways to improve system characteristics was discussed.

Key words

Wireless optical link, VLC, optical communication, LED, photodiode, infrared spectrum, UV spectrum, visible spectrum

Bibliografická citace

KOVÁŘ, O. Návrh optické bezkabelové linky malého dosahu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 87s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Diblík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh optické bezkabelové linky malého dosahu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Janu Diblíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část.....	2
2.1	Definice telekomunikace	2
2.2	Historický vývoj v telekomunikaci.....	2
2.2.1	Optický telefon (Photophone)	5
2.3	Optické bezdrátové spoje (OBS)	6
2.3.1	Definice	6
2.3.2	Úvod	6
2.3.3	Skladba spoje.....	7
2.4	Modelový příklad bezdrátové optické linky	8
2.5	Analogová a digitální optická komunikace	9
2.6	Modelová energetická bilance spoje.....	10
2.6.1	Energetická rezerva	11
2.7	Klady a zápory optických bezdrátových spojů.....	13
2.7.1	Výhody OBS	13
2.7.2	Nevýhody OBS	13
2.8	Optické zdroje pro bezdrátové spoje	14
2.8.1	Laser	14
2.8.2	LED	17
2.8.3	Konstrukce	18
2.8.4	Výhody LED	18
2.9	Fotodiody.....	19
2.9.1	Princip	19
2.9.2	Voltampérová charakteristika fotodiody	19
2.9.3	Lavinová fotodioda APD (Avalanche photodiode).....	20
2.9.4	Fotodiody typu PIN	21
2.10	Satelitní optické spoje (SOP)	22
2.10.1	Projekt SILEX	23
2.10.2	Projekt KIRARI.....	24
2.10.3	Projekt CAPANINA.....	25
2.10.4	Projekt KIODO	26
2.10.5	Projekt MOND	26
2.10.6	Projekt MTO	27
2.11	Optický indoor spoj.....	28
2.12	Principy šíření	28

2.13	Bezdrátová indoor komunikace pomocí infračerveného světla	30
2.13.1	Vliv infračerveného záření na člověka	32
2.14	Bezdrátová indoor komunikace v UV spektru	33
2.15	Bezdrátová indoor komunikace ve viditelném spektru (VLC)	34
3	Návrh optického vysílače a přijímače.....	36
3.1	Úvod	36
3.2	Volba komunikačních diod.....	37
3.2.1	Komunikace ve viditelném spektru	38
3.2.2	Komunikace v infračerveném spektru.....	40
3.3	Volba fotodiod	43
3.3.1	Fotodioda pro VLC	43
3.3.2	Fotodioda pro IR pásmo	45
4	Obvodové řešení spoje	47
4.1	Návrh stabilizátoru	47
4.2	Návrh vysílačů	48
4.2.1	Centrální (Stropní) jednotka - vysílač	48
4.2.2	Mobilní (Uživatelská) jednotka - vysílač	51
4.3	Návrh přijímačů	53
4.3.1	Mobilní (Uživatelská) jednotka - přijímač	53
4.3.2	Centrální (Stropní) jednotka - přijímač	55
5	Realizace komunikačních jednotek	57
5.1	Úvod	57
5.2	Centrální (Stropní) jednotka	57
5.3	Mobilní (Uživatelská) jednotka	59
6	Testování navrhnutého optického spoje.....	61
6.1.1	Měření maximální komunikační vzdálenosti	62
6.2	Měření výkonu LED při modulaci.....	63
6.3	Měření fázového posunu	64
6.4	Měření diagramu oka.....	67
7	Návrhy na zlepšení	68
8	Závěr.....	69
9	Seznam použité literatury a jiných zdrojů.....	70
10	Seznam tabulek.....	73
11	Seznam zkratk	74
12	Seznam obrázků	75
13	Seznam příloh	76

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu optického bezdrátového spoje malého dosahu, který by našel uplatnění uvnitř komerčních budov, kancelářských prostor nebo pro ryze domácí použití. Strukturálně je práce rozčleněna celkem do čtyř rozsáhlých kapitol na část vymezující teoretické poznatky, část týkající se výběru optických komponent, kapitolu o realizaci modulů a kapitolu týkající se testování vyrobených komponent.

První kapitola je věnována utřídění teoretických poznatků týkajících se vývoje optické komunikace, popisu jednotlivých důležitých částí pro vysílací a přijímací moduly, rozvoji optické komunikace na velké vzdálenosti a v poslední řadě popisu optických spekter vhodných pro realizaci navrhovaného systému. Vše začíná popisem historického vývoje optické komunikace ve starověkých říších pomocí signálních ohňů a pokračuje dále v čase přes telegrafy až po vynález optického telefonu od A. G. Bella. Následuje subkapitola popisující funkci emitůrů (LED a laserů) a detektorů (AVP a PIN fotodiod). Nakonec je část věnující se popisu optických spekter s jejich výhodami a nevýhodami uvažovanými pro jejich užití v navrhovaném komunikačním systému.

Druhá kapitola opouští teoretickou rovinu a věnuje se přímému návrhu komunikačních modulů. Nejprve je zde popsáno jakým způsobem a podle jakých kritérií probíhal výběr esenciálních součástí pro navrhovaný spoj, tedy LED diod a detekčních fotodiod. Následuje laboratorní ověřování hodnot stěžejních parametrů. U emitůrů je testována dominantní vlnová délka, vyzařovací směrová charakteristika a závislost velikosti optického výkonu na vzdálenosti vysílače-detektor. U fotodiod je testována směrová charakteristika. Všechny naměřené hodnoty jsou posléze porovnávány s hodnotami uváděnými výrobcem a případné vzájemné rozdíly a odchylky jsou diskutovány.

Následující kapitola se věnuje obvodovému řešení komunikačních jednotek. Nejprve je zde popsána realizace spínaného stabilizátoru pro oba moduly. Poté následuje návrh schémat vysílačů a přijímačů s odůvodněnou volbou vhodných reálných komponent jako jsou například operační zesilovače, tranzistory či optočleny. V druhé části třetí kapitoly je popsáno osazení desek plošných spojů vybranými komponenty a jsou zde komentovány různé kroky, které vedly k prezentovanému rozmístění komponent po obou stranách desek plošných spojů.

Poslední kapitola této práce se zabývá testováním navrhnutého a sestrojeného komunikačního systému. Testován je maximální použitelný dosah spoje při různých frekvencích a střídách modulačního signálu, je zde porovnáván výkon přijatý fotodiodou při různých nastaveních frekvencí a stříd modulačního signálu. Dále je měřen fázový posun mezi vysílaným a přijímaným signálem v závislosti na změně frekvence a stříd modulačního signálu a na vzdálenosti mezi emitorem a detektorem. Posledním měřením průběhem je diagram oka.

Na samotný závěr diplomové práce je uvedena samostatná kapitola pojednávající o tom, co by se dalo na navrženém systému změnit v závislosti na zkušenostech získaných po proměření obou modulů.

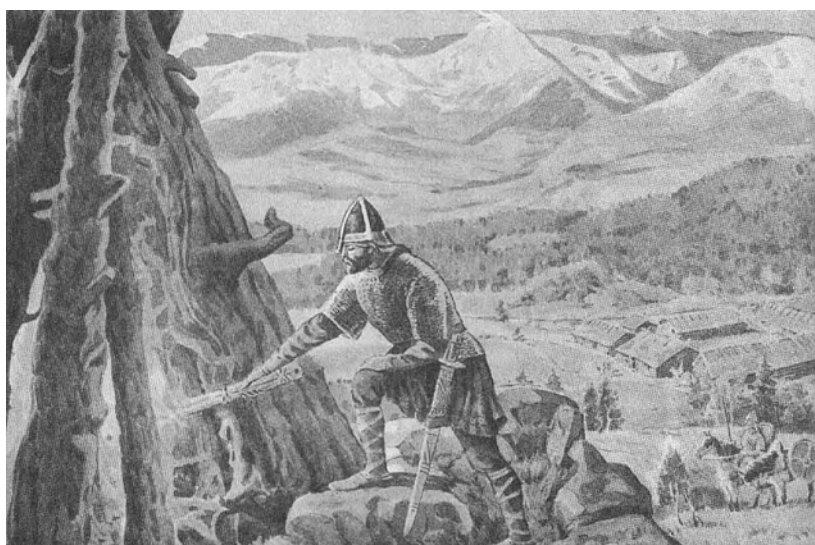
2 Teoretická část

2.1 Definice telekomunikace

Slovo telekomunikace pochází původně z řečtiny a je to složenina slov tele-vzdálený a komunika-mluvit. Dle definice ITU z roku 1932 je telekomunikace definována následovně. Pod pojmem telekomunikace rozumíme veškerý přenos, vysílání a příjem znaků, signálů, psaných dokumentů, obrazu, zvuku nebo informací jakékoliv povahy prostřednictvím vedení, rádiových vln, opticky či prostřednictvím jiných systémů pracujících na elektromagnetickém principu [26].

2.2 Historický vývoj v telekomunikaci

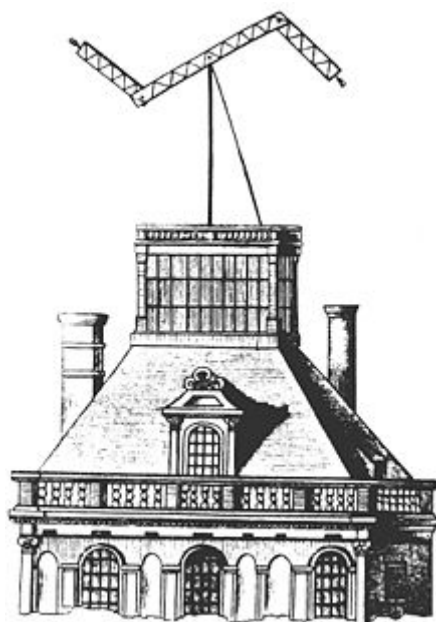
V dnešním 21. století máme nespočet možností, jakým způsobem vést informaci. Pokud se chceme věnovat historii telekomunikace od jejich prvopočátků, musíme se podívat do doby hluboko před naším letopočtem. Nejstarší dochované zmínky o komunikaci na dálku pochází z Homérových děl Ilias a Odysea, kde se můžeme dozvědět, že pád slavné Tróje byl zbytku světa oznámen pomocí zapálení signálních ohňů na vrcholcích kopců. Nebo v díle Agamemnón je barvitě vyličeeno, jak král nechal zbudovat na vrcholcích osmi hor stavby, které by se daly nazvat nejlépe majáky (z anglického slova “beacon“), ty dokázaly předat zprávu až na vzdálenost 550 kilometrů. Posuneme-li se v čase blíže počátku našeho letopočtu, nacházíme zmínky o vylepšeních dálkové komunikace. 400 let před naším letopočtem, známý vojevůdce a hlavně výborný taktik jménem Aeneas, přišel s prvním kódem, jehož princip spočíval v zapálení určitého počtu separovaných ohňů, čímž se dalo přenést větší množství informací ovšem zase na kratší vzdálenost. Nejpokročilejší soustavu signalizačních ohňů mělo dozajista Římské Impérium, které bylo skrz na skrz protkáno sítí signalizačních bodů, čímž byla celá země včas varována pře blížícím se nebezpečím.



Obr. 2-1 Zapálení signalizačního ohně [24]

Další velký milník byl pokořen v době, kdy se obyvatelům afrického Kartága podařilo pomocí obřích signálních ohňů kontaktovat obyvatele až na daleké Sicílii. Takovýmto způsobem se rozvíjela dálková (optická) komunikace u nás v Evropě. Na podobném principu fungovala komunikace i na jiných světadílech. Na Americkém kontinentu používali zdejší původní obyvatelé, indiáni, ke komunikaci kouřové signály. Naproti tomu v Asii se můžeme z nejstarších dochovaných textů dozvědět, že místní obyvatelé užívali k předání informací běžné větrné draky. V útrokách těchto vznášejících se draků byla umístěna drobná svítilna pro snadnější upoutání pozornosti. Tento způsob fungoval sice na podstatně kratší vzdálenosti nežli evropské ohnivé majáky, avšak obrovským plusem byla mobilita tohoto komunikačního systému. Takovéto způsoby telekomunikace, ať se na ně díváme sebevíc kriticky, plnily skvěle svou funkci a přitom byly z našeho pohledu naprosto primitivní.

Pokud chceme mluvit o komunikaci v podobě alespoň krapet podobné, jakou známe z dnešní doby, musíme se na časové ose přesunout podstatně kupředu. Prvním vynálezem, o kterém se dá mluvit jako o telekomunikačním zařízení, je takzvaný optický telegraf, za jehož vynálezce je pokládán francouzský vynálezce Claude Chappé. Nutno podotknout, že na konci 18. století se na patentových úřadech tvořili fronty lidí, kteří chtěli zaregistrovat svůj jedinečný optický telegraf, namátkou bych zmínil vynálezce Dupuise či Brestrassera, avšak ze všech těchto návrhů byl zvolen jako nejefektivnější a nejlepší právě ten od Clauda Chappého.



Obr. 2-2 Realizace Chappého telegrafu, Louvre, Francie [27]

Své vítězství korunoval Chappé na konci 18. století tím, že dostal od francouzské vlády zakázku k vybudování telegrafního spojení mezi Paříží a Lille, tedy na vzdálenosti přes 230km. Na této trase bylo postaveno 15 stanic a první symbol byl přenesen z Paříže do Lille za necelých 9 minut. Celá věta, kde počítáme průměrně 36 symbolů, trvala potom něco málo přes 32 minut, což byl na tu dobu až neuvěřitelný pokrok. Výhoda a rychlost telegrafů zaujala například samotného Napoleona, který vybavil své vojsko přenosnými verzemi těchto telegrafů. Postupem doby byly budovány nové a delší spojení, čímž vznikala celistvá síť, jež pokrývala takřka celou Francii. Takováto vyspělá telegrafní síť však nezůstala jen vnitrostátní prvkem, nýbrž se rozšiřovala za hranice a začala spojovat důležitá města sousedních států.

Zde by se dala jmenovat spojení mezi Paříží a Štrasburkem z roku 1798 či prodloužení spojení Paříž-Lyon až do italského Milána z roku 1809. Vrcholného rozmachu dosáhl optický telegraf v roce 1844. V tomto roce bylo ve Francii spočítáno na 534 telegrafních stanic, které pokrývaly trasu dlouhou více než 5000km. Rok 1845 však srazil optickým telegrafům vaz, byl to rok objevu elektrického telegrafu.

Během dlouhých let se snažili vědci přijít na dostatečně silnou invenci v oblasti optického telegrafu, která by mu vrátila zpět jeho zašlou slávu. Mezi významnější objevy patřil telegraf Gourdou-Lesuerra z roku 1870, který zachránil obléhanou Paříž ve chvíli, kdy komunikace pomocí klasického elektrického telegrafu selhala. Lesuerrův telegraf fungoval na principu postupného fokusování světla, vydávaného olejovou lampou v noci, nebo slunečním svitem za dne, pomocí soustavy zrcadel a clon. Výstupním prvkem tohoto telegrafu jsou krátké a dlouhé světelné intervaly odpovídající tečkám a čárkám, které reprezentují převod jednotlivých písmen do Morseova kódu. Rychlost přenosu informací u tohoto telegrafu činila něco málo přes 20 slov za minutu a v závislosti na podmínkách se dala uplatnit komunikace až na vzdálenost 120 km. To ovšem vyžadovalo, aby byl naprosto čistý vzduch bez jakýchkoliv srážek či mlhy. Samozřejmostí je, že k pozorování na tak velkou vzdálenost bylo zapotřebí použití dalekohledu na stranách příjemců.

Od Laseureho optického telegrafu je to jen krůček k nástroji, který byl nazván heliograf. Zvláštním a jedinečným z něj dělá fakt, že jako jediný ze všech doposud jmenovaných vynálezů nachází své uplatnění i v dnešní době, a to jako součást výbavy pro přežití například u letadel. Princip funkce je jednoduchý. K odrazení slunečních paprsků směrem ke vzdálenému pozorovateli využívá přístroj zrcadlo, jehož pohyby obsluha heliografu přeměňuje sluneční světlo na jednotlivé záblesky.

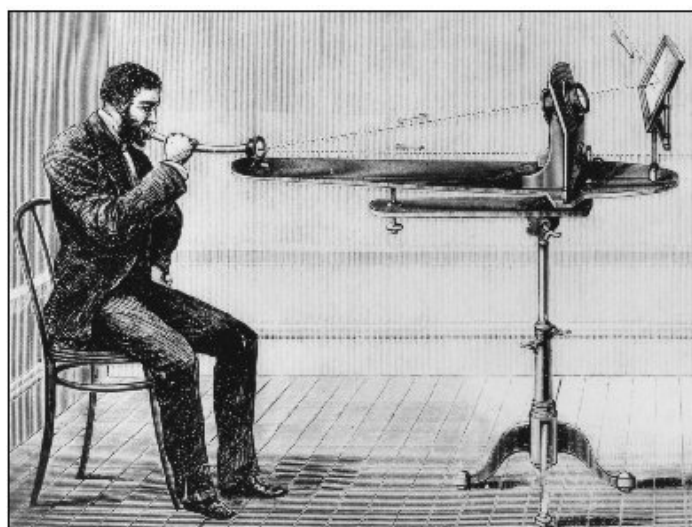


Obr. 2-3 Heliograf na Milešovce[28]

Největším kladem tohoto přístroje je mobilita, na svou velikost nízká váha, jednoduchost konstrukce a poměrně velká odolnost. Záporům je však absence vlastního zdroje záření, čili je plně odkázan na sluneční paprsky. Pokud bude na obloze značná oblačnost, je komunikace pomocí heliografu prakticky vyloučena.

2.2.1 Optický telefon (Photophone)

Posledním vynálezem, který dle mého úsudku stojí za zařazení do této kapitoly, je přístroj, který v roce 1880 vynalezl Alexander Graham Bell. Do češtiny bývá překládán jako fotofón, optický telefon, případně se nepřekládá vůbec. Šlo o naprosto průlomový vynález, kde se díky jeho mechanismu informace nešířila po kovovém kabelu, ale za nosiče informace daly považovat samotné sluneční paprsky. V dnešní době se o optickém telefonu mluví o jakožto prvním přístroji, na kterém byly demonstrovány základní principy moderní optické komunikace. Přístroj se dělil na 2 části. Vysílací část se skládala ze směrového zrcadla, které odráželo sluneční paprsky na pružnou membránu. Na tuto membránu bylo pomocí vzduchu přenášeno slovo mluvčího, na membráně došlo k modulaci řečového signálu na paprsky světla. Druhá přijímací část se skládala z parabolického reflektoru, v jehož ohnisku byly umístěny selenové články. Ty byly pomocí drátů propojeny na sluchátka. První přenos realizoval A. G. Bell na vzdálenost 200 metrů a dle jeho slov, to byl jeho nejcennější vynález. Sám předpověděl optickému telefonu slibnou budoucnost, jelikož si byl jist, že optický telefon vytlačí z výsluní jeho předchozí vynález – klasický telefon, komunikující po metalickém vedení. Jak je všeobecně známo, proroctví se však nenaplnilo. Telefon se stal po staletí fenoménem a nepostradatelným pomocníkem, kdežto optický telefon upadl v zapomnění. Úpadek byl zapříčiněn nestálostí vynálezu. Byl až příliš závislý na slunečních podmínkách, kde nemyslím radikální změnu oblačnosti, ale například jen to, že slunce měnilo svou polohu na obloze či svou intenzitu záření.



Obr. 2-4 Ilustrace A. G. Bella testujícího vysílací část optického telefonu [29]

Po 120 letech se vědci znovu zamysleli nad Bellovou myšlenkou optického telefonu a za použití moderních technologických postupů vznikly optické bezdrátové spoje s velmi vysokými přenosovými rychlostmi. Slunce jako takové, díky jeho proměnlivosti, nemohlo být použito jako nosič informace, zato tenký optický svazek, který dokážeme plně přizpůsobit našim požadavkům, se jevil jako ideální řešení. Takovéto paprsky fotonů produkované lasery, jejichž charakteristika je nám velice dobře známa (vlnová délka, počet emitovaných fotonů a doba jejich emise) jsou detekovány extrémně citlivými optickými přijímači. Jakožto přenosové médium slouží opět atmosférický obal Země, jehož vlastnosti jsou silně proměnlivé, s tím si ale optika a moderní elektronika v současné době dokáže velice dobře poradit.

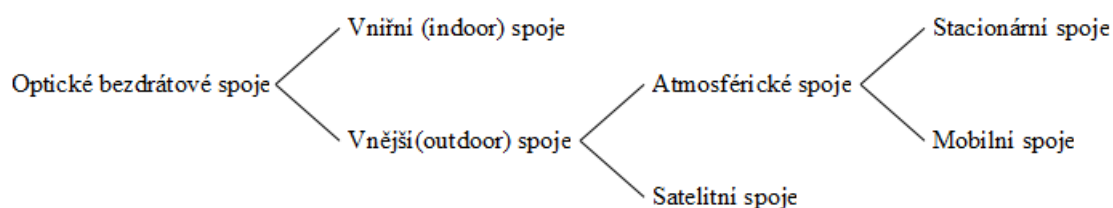
2.3 Optické bezdrátové spoje (OBS)

2.3.1 Definice

Optickým bezdrátovým spojem se rozumí komunikační technologie, která přenáší signál v atmosféře nebo kosmickém prostoru. Optický výkon je soustředěn do jednoho nebo více svazků. Optický svazek může obsahovat několik optických kanálů dělených technikou WDM[3].

2.3.2 Úvod

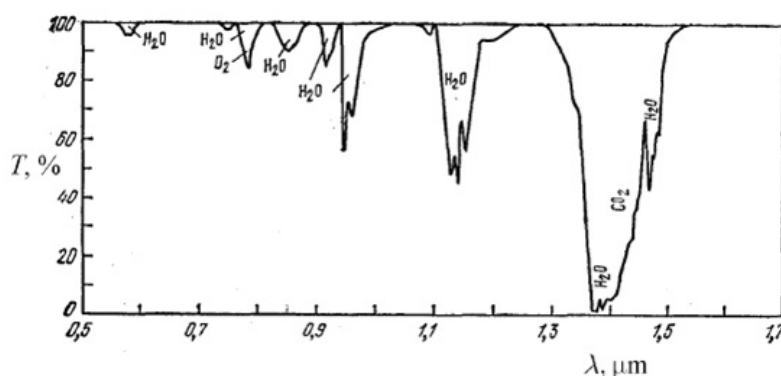
Touto kapitolou končí výčet historických vynálezů a nastává přesun k jádru této diplomové práce. Vznik optických spojů byl možný až v době, kdy byly značně vylepšeny technologie laseru, laserových diod, LED diod, nízko-útlumových optických vláken a fotodiod. Každý z těchto prvků je pro konstrukci optického spoje naprosto esenciální a má na kvalitu přenosu podstatný vliv. Optický spoj lze realizovat klasickou kabelovou cestou za použití nízko-útlumových optických vláken jakožto vodičů optického signálu nebo je tu možnost přenášet signál skrze volný prostor. Optický bezdrátový spoj je označován českou zkratkou OBS, popřípadě anglickou zkratkou FSO ze slov Free Space Optics. OBS jsou děleny dle místa jeho užití na spoj vnější-outdoor a na spoj použitý uvnitř budov, pro který se vžilo anglické označení indoor. Outdoorové spoje dále dělíme na spoje atmosférické, kde paprsek neopustí atmosféru planety, a na spoje satelitní pracující s družicemi na oběžných drahách ve vesmíru. Atmosférické spoje se dále ještě dělí na stacionární a mobilní typy. Tato práce se bude primárně věnovat indoorovým spojům, avšak v krátké zmínce nebude opomenuta žádná skupina.



Obr. 2-5 Grafické znázornění dělení OBS

2.3.3 Skladba spoje

Jak bylo napsáno v předchozí kapitole, skladba optického bezdrátového spoje ve zjednodušené formě je tvořena 2 základními částmi - přijímací a vysílací hlavicí. Nejdůležitější komponentou ve vysílací části je zdroj nosiče přenášené informace, tedy zdroj světelného záření. Tímto emitorem může být laser, laserové diody (LD) nebo klasická LED dioda. Volba emitoru se odvíjí dle požadavků na komunikační systém. Pokud je v návrhu optický spoj s plánovaným dosahem v řádu stovek metrů, bude nutné použít laseru, jelikož diodové systémy, díky jejich vlastnostem, nemohou dosáhnout takovýchto vzdáleností. U atmosférických spojů musíme navíc vybírat lasery s takovou vlnovou délkou, aby jejich útlum v atmosféře byl co nejmenší. Primárně se volí mezi třemi vlnovými délkami a to 850nm, 1060nm a 1550nm. Důvod je patrný z následujícího obrázku.



Obr. 2-6 Grafické znázornění závislosti útlumu atmosféry na vlnové délce záření[30]

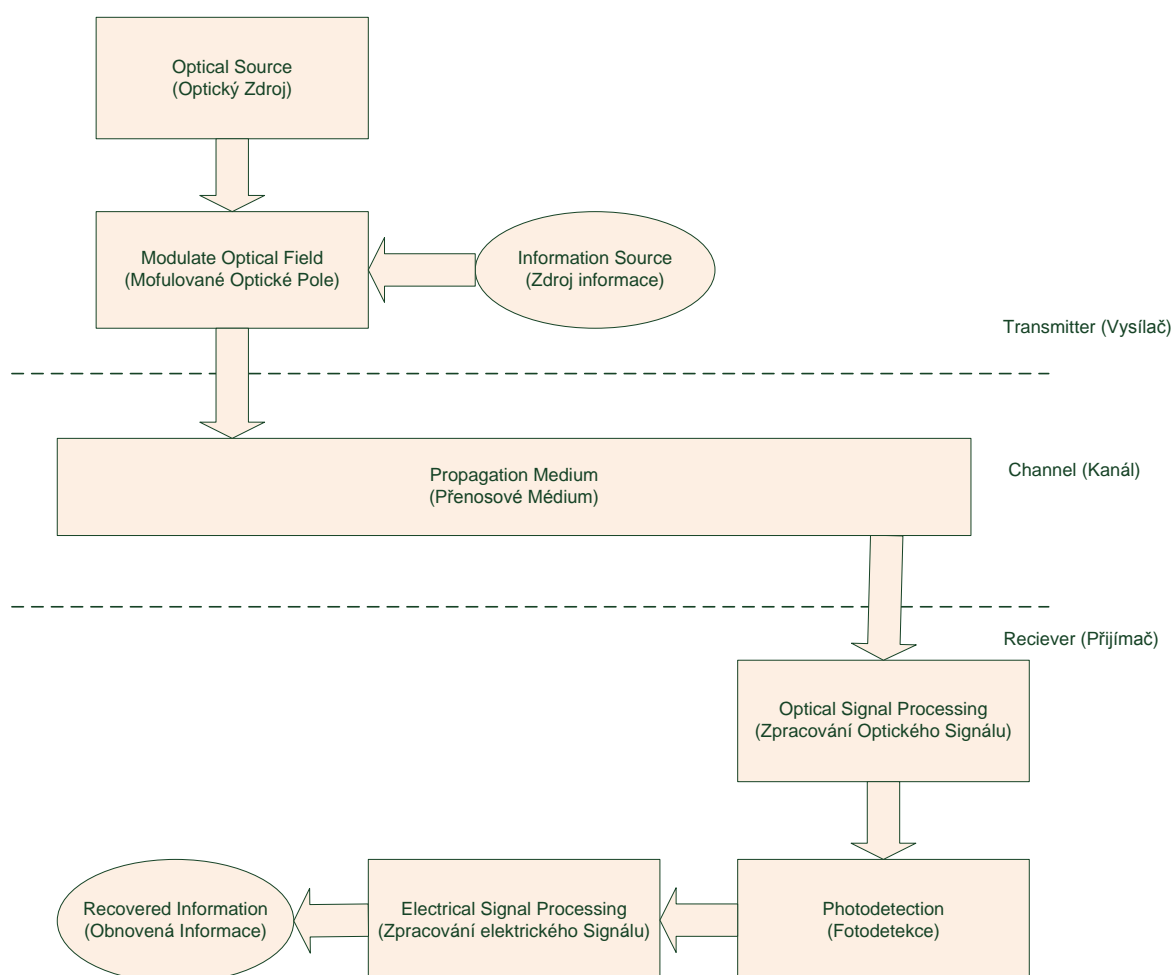
Jak je z grafu patrné, tři jmenované vlnové délky, označované také jako optická okna a jejich blízké okolí, jsou pro komunikaci pomocí atmosférického spoje uvnitř naší atmosféry jedny z nejvhodnějších. Ve světových laboratořích zabývajících se optikou se však experimentuje se s atmosférickými systémy, kde jsou ve vysílači použity lasery s jinými vlnovými délkami. Přenášené informace jsou ovlivněné útlumy podstatně více, avšak měření na těchto vlnových délkách přináší nové poznatky a objevy. Přijímače OBS jsou vybaveny velice citlivými fotodiodami typu PIN, popřípadě lavinovými. Výhody a nevýhody obou těchto přijímacích systémů jsou popsány v následující kapitole. Celková konstrukce hlavic znázorněná na následujícím obrázku se může jevit jako dosti robustní. Vezmeme-li ale v úvahu to, že vysílač i přijímač se nesmí prakticky za žádných okolností vychýlit ze své pevně nastavené polohy a nebo, že toto robustní tělo má své opodstatnění například v ochraně citlivé vnitřní optiky a elektroniky, jeví se tato konstrukce jako opodstatněná.



Obr. 2-7 Hlavičky pro atmosférický spoj. Vlevo vysílač, vpravo přijímač [31]

2.4 Modelový příklad bezdrátové optické linky

Zobecněný princip optické linky je znázorněn na následujícím obrázku. Zdroj přenášené informace moduluje optické pole generované optickým zdrojem. Takto modulovaný svazek poté putuje skrze dané médium (dle typu spoje buďto optickým vláknem nebo volným prostorem) do přijímače. Přijímač se dá rozdělit na několik funkčních bloků. Prvním z nich je označován jako OPS z anglického Optical Signal Processing (zpracování optického signálu). Tento blok reprezentuje skupinu zařízení, která upravuje vstupní signál před tím, než je vůbec detekován. Patří sem například optické filtry, fokusační prvky, popřípadě interferometry. Poté co je optický svazek zpracován v bloku OPS, je následně přiveden na detekční plochu fotodiody. Proces fotodetekce spočívá v přeměně energie elektromagnetického záření na elektrickou energii. Posledním pomyslným blokem je ESP (Electrical Signal Processing), který zde vykonává veškeré potřebné funkce ke konečnému obnovení vyslané zprávy.

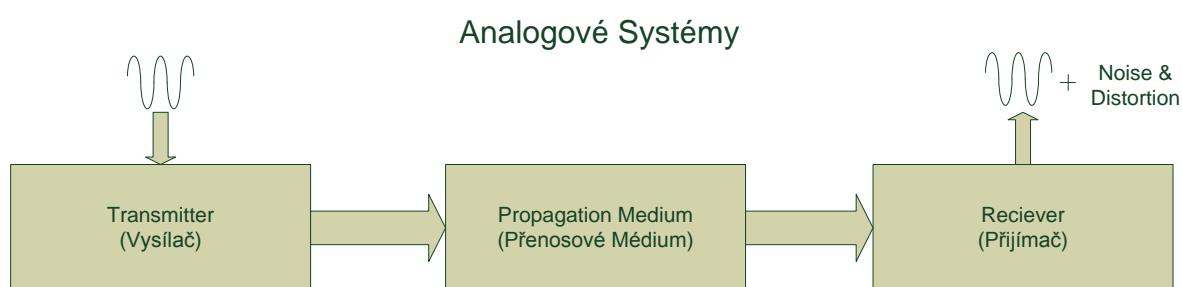


Obr. 2-8 Schéma optické bezdrátové linky

2.5 Analogová a digitální optická komunikace

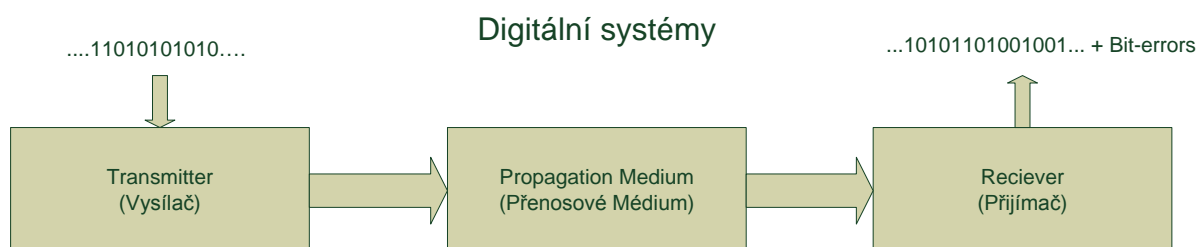
Optická komunikace se dá z hlediska principu své funkce dělit do dvou širších skupin, a to na analogové systémy a digitální systémy. Na následujícím obrázku jsou znázorněny rozdíly mezi těmito systémy.

Analogové komunikační systémy přenášejí vlnění spojitě v čase od vysílače k přijímači a jsou navrženy tak, aby minimalizovaly vzniklý šum a zkreslení u obnoveného vlnění. Jejich výhoda vůči digitálním systémům je užití v situacích, kdy přenášená informace je buďto širokopásmová nebo vysokofrekvenční, a v případě kdy převod z analogového signálu na digitální má pro nás nedostatečnou přesnost či citlivost.



Obr. 2-9 Schéma analogového systému

Digitální systémy nacházejí své uplatnění zase tam, kde informace existuje jako tok binárních čísel. Jejich přesnost určuje schopnost minimalizovat počet chyb ve výstupním datovém toku. Digitální systémy jsou specifikovány několika faktory, jako je datová rychlost, pravděpodobnost výskytu chyby a hodnotou BER. Hodnota $BER=10^{-6}$ znamená, že v průměru dojde k přenosu jednoho chybného bitu na 1 milion přenesených bitů. Tato hodnota se může jevit z hlediska laika jako naprosto dostatečná pro jakékoliv potřeby, to však není pravda. Například pro datové přenosy mezi velkými bankovními institucemi, je nutností mít hodnotu ber minimálně o 3 řády vyšší.



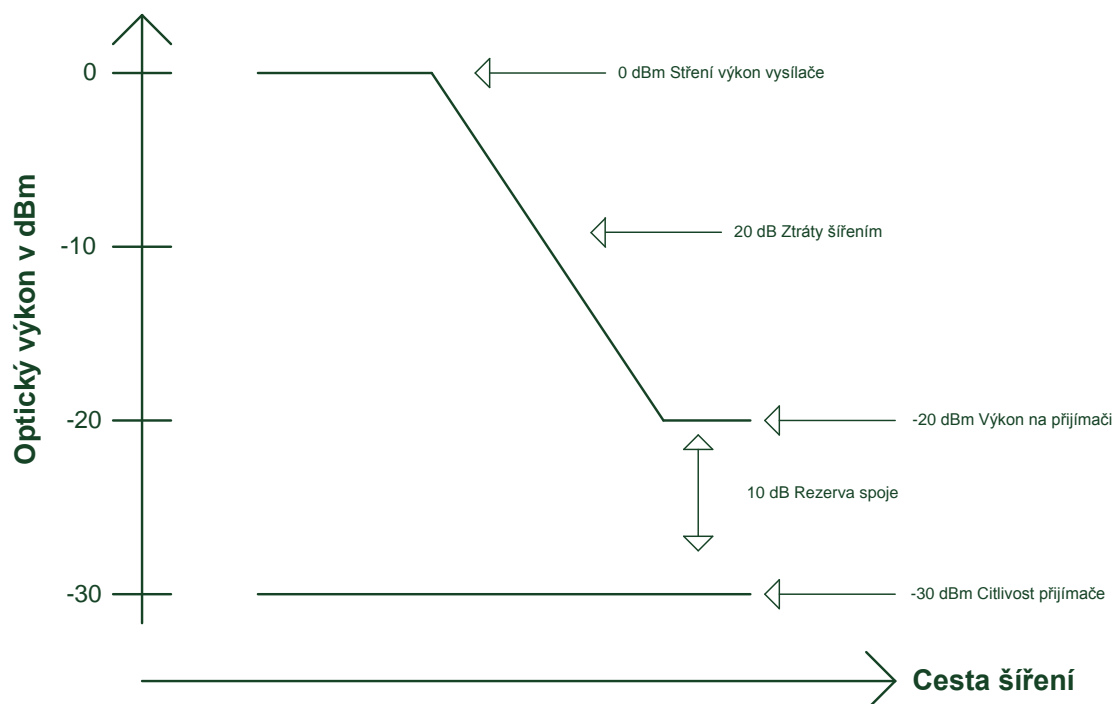
Obr. 2-10 Schéma digitálního systému

2.6 Modelová energetická bilance spoje

Energetická bilance nám přináší celkový součet všech zisků (zesílení) a ztrát (útlumů), se kterými se musí počítat při návrhu a simulaci plánovaného optického spoje. Bilance začíná konečnou hodnotou výkonu vysílače, k zisku dále přispívají vysílací a přijímací zesilovače, naproti tomu k útlumům přispívají modulátory, přenosy prostředím, elektrotechnické nedostatky atd. Všechny energetické bilance optických spojů se skládají alespoň ze tří oddílů, jedna skupina pro vysílač, jedna pro samotný kanál a jedna pro přijímač. Na následujícím obrázku je zobrazena tabulka jakožto modelový příklad bilance základního optického spoje.

Item	Value	dB Value
Vysílač		
1. Střední výkon vysílače	1.0 mW	0.0 dBm
Kanál		
2. Ztráty šířením	99% výkonu vysílače	-20 dBm
Přijímač		
3a. Přijatý výkon		-20.0 dBm
3b. Citlivost přijímače		-30.0 dBm
Rezerva spoje (Výkonová rezerva)		+10.0 dBm

Výkonová rezerva se spočítá jako rozdíl výkonu na přijímači a citlivosti přijímače tedy dle tabulky $3a - 3b \Rightarrow -20 - (-30) = +10$ dBm.



Obr. 2-11 Model energetické bilance

Tento model pracuje s vysílačem o středním výkonu 1mW a celkovém útlumu prostředí 20 dB odpovídající určité vzdálenosti l. Takovýto útlum 20 dB znamená, že pouze 1% vyslaného výkonu signálu dopadne na detekční plochu fotodiody. Zbytek vyzářeného výkonu vysílače je ztracen během průchodu prostředím. Takováto ztráta se jeví jako dosti velická, ale na poli optických komunikací je ještě velmi malá. Důležité je, aby výkon dopadající na fotodiodu byl větší, než jeho hodnota citlivosti daného detekčního prvku. Tato citlivost je definována jako nejnížší možné množství optické energie, které musí být přítomno na přijímači, aby byly splněny uživatelské nároky na QOS (Quality of Service). V případě řešené modelové bilance je tato hodnota -30dBm, takže námi vyslaný signál bude fotodiodou detekovatelný.

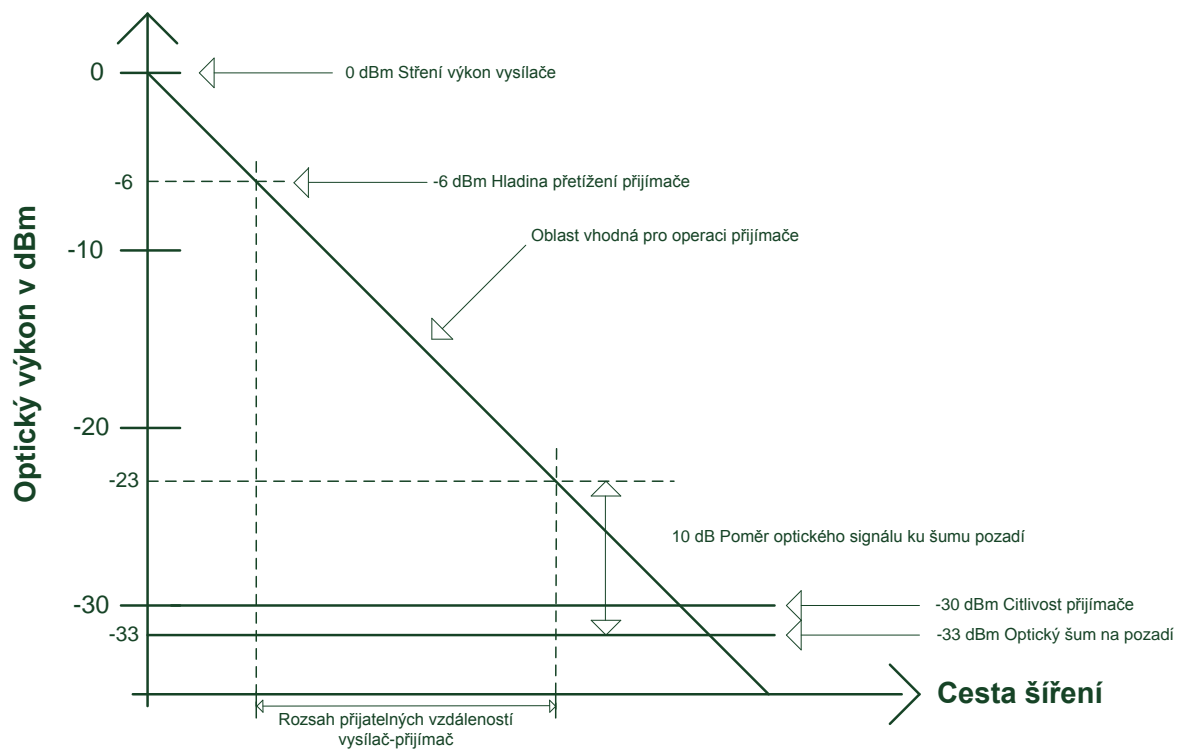
Nepsaným pravidlem v sestavování energetické bilance je, že jednotlivé položky jsou obvykle vyjádřeny ve formě decibelů, což umožňuje tyto hodnoty jednoduše sčítat.

2.6.1 Energetická rezerva

Je definována jako rozdíl energie dopadající na přijímač a citlivosti přijímače. Pokud je tato hodnota kladná, znamená to, že námi navržený systém má ještě určitou rezervu a může být realizován. Pokud je ovšem hodnota záporná, pak tedy tento systém (vysílač, kanál a přijímač) nelze sestavit a je nutno problém řešit zvýšením výkonu vysílače, osazením citlivějšího přijímače, volbou vhodnějších optických prvků.

Všechny komunikační systémy, které vyžadují dodržení specifické hodnoty QOS potřebují, aby byla zajištěna minimální hodnota poměru signálu k šumu (SNR) v přijímači. Nejdůležitějším atributem pro splnění této podmínky je citlivost přijímače. Přesná hodnota SNR je závislá na šumové statistice přijímače, typu modulace, detekci, korektní demodulaci, nedokonalostech modulátoru, fotodetektoru a demodulátoru, optických nelinearitách a na jakýchkoliv technikách použitých pro opravování chyb. Dále musíme zohlednit i postupné opotřebení součástek způsobené časem, četností použití a celkovým vytižením. Z tohoto důvodu je vhodné navrhovat systémy s dostatečnou rezervou, aby se i po delší době provozu nezhoršil poměr S/N a tím nedošlo i k zhoršení QOS.

Na následujícím obrázku je zobrazeno grafické řešení energetické bilance, kde je úkolem ukázat, jakým způsobem se určuje oblast vhodná pro operaci přijímače. Osa X zde reprezentuje cestu šíření, respektive její vzdálenost. Není zde však použito žádné měřítko, namísto toho každý z příspěvků energetické bilance zaujme danou část osy X. Osa Y koresponduje s množstvím optického výkonu přítomného ve spoji. V našem případě začíná bilanční křivka na hodnotě 0dBm a lineárně klesá díky průchodu kanálem až na hodnotu -20dBm. Přímka na hladině -30dBm zde zastupuje citlivost přijímače. Dále je zakreslena rezerva spoje. Ta je určena jako 7dB od hladiny citlivosti přijímače, nebo také 10dB od hladiny NEP. Hladina NEP (noise equivalent power) označuje zářivý výkon, při jehož detekci je na výstupu detektoru poměr signálu ku šumu roven jedné, z čehož plyne, že čím je tato hodnota nižší, tím lépe jsou detekovány slabé signály. V našem případě je roven hodnotě -33dB. Přijímač je omezen i maximálním možným přijatým výkonem, což stanovuje druhou limitu v grafu. Tento výkon byl zvolen na hodnotu -6dBm. Tím je hledaná oblast pro operaci detektoru jasně vymezena, jak znázorňuje následující obrázek.



Obr. 2-12 Podrobnější graf energetické bilance

2.7 Klady a zápory optických bezdrátových spojů

2.7.1 Výhody OBS

1. Komerční využívání OBS není licencované (nutné zdůraznit prozatím)
2. Díky principu jejich fungování nedochází ke znečišťování životního prostředí vyzařováním elektromagnetické energie, jako je tomu u rádiových spojů.
3. Komunikace pomocí optického svazku, jež má tloušťku v řádech miliradiánů, je jen velmi těžko napadnutelná třetími osobami - odposlech (platí pro směrové spoje). Jediná možnost odposlechu je přímé narušení dráhy paprsku, což může být velice snadno detekováno a komunikace promptně přerušena.
4. Z hlediska využívaných šířek přenosového pásma se OBS velice snadno začleňují do rozsáhlých optických sítí, které jsou v současnosti nejpoužívanějšími komunikačními sítěmi na celém světě.
5. Mohou pracovat v režimu jedno-fotonového přenosu technikou distribuce kvantových stavů fotonů umožňující aplikaci optické kvantové kryptografie s vysoce zabezpečeným přenosem utajovaných zpráv.
6. OBS je schopen přenášet data velmi vysokými rychlostmi až 2,5Gbps.

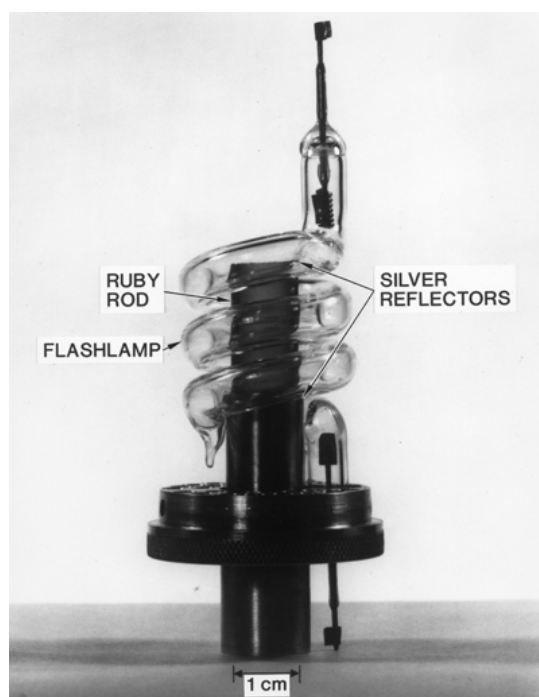
2.7.2 Nevýhody OBS

1. Kvalita přenosu informací je vždy nejvíce závislá na přenosovém médiu. V našem případě při použití OBS je médiem atmosféra, a tudíž je naším nepřítelem jakákoliv oblačnost, vlhkost či srážky. Díky modernizaci a nezastavitelné invenci v oblasti OBS jsme již schopni eliminovat některé atmosférické útlumy (například pomocí výkonové rezervy, vícesvazkového šíření nebo použitím alternativního (rádiového) vysílání v případě nutnosti), avšak zdaleka ne všechny. Popisům problematiky šíření a druhům útlumů se věnuji v jedné z následujících kapitol.
2. Z principu fungování těchto spojů je nutná viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Pokud dojde k narušení této přímé trasy jen na krátký okamžik, je spoj schopen výpadek potlačit a komunikaci zpětně navázat. Pokud se vysílací a přijímací stanice nenachází v přímé viditelnosti, je nutné použít překlenovacího prvku, jako například družice. Toto řešení je finančně velmi nákladné a navíc je nutné uvažovat, k jakým ztrátám dojde při průchodu vrstvami atmosféry.
3. Běžný stacionární pozemní spoj má omezený dosah. Nejlepších vlastností dosahuje na poměrně krátkou vzdálenost v řádu jednotek kilometrů, s přibývajícím vzdáleností však roste pravděpodobnost výskytu atmosférických nehomogenit a tím možnost přerušení spoje. Díky neustálé modernizaci a vývoji v oblasti optických spojů se maximální vzdálenosti stále zvětšují. Takovéto omezení neplatí pro kosmické optické spoje, kde komunikace probíhá i na meziplanetární úrovni (vzdálenosti miliónů kilometrů).

2.8 Optické zdroje pro bezdrátové spoje

2.8.1 Laser

LASER je zkratkové slovo, jehož celé znění pochází z angličtiny a zní Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. To lze do češtiny přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser jako takový je vlastně zdroj elektromagnetického záření. Toto záření je charakteristické svou koherencí (vlnění má stejnou frekvenci, směr a fázi, popřípadě fázový rozdíl), monochromaticností (vlnění obsahuje pouze jednu vlnovou délku), nízkou rozbíhavostí (divergencí) svazku a vysokou hustotou přenášeného výkonu. První laser byl sestaven v roce 1960 T. H. Maimanem a šlo o tříhladinový, pevnolátkový rubínový laser pracující v pulsním režimu.



Obr. 2-13 Prototyp prvního laseru vynalezeného T. H. Maimem [32]

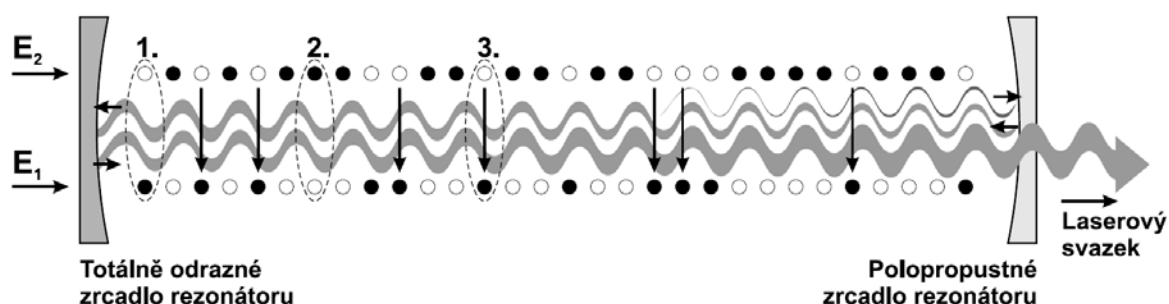
2.8.1.1 Princip funkce

Ačkoliv existuje velké množství rozličných typů laserových generátorů, každá konstrukce v sobě musí obsahovat tři základní součásti:

1. Laserové aktivní prostředí - zde probíhá zesilování záření
2. Zdroj čerpání - excitace aktivního prostředí
3. Rezonátor - vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucím ke vzniku laserových oscilací

Funkce laseru spočívá v procesu zvaném stimulovaná emise, který nastává při interakci excitovaného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením - fotonem, jehož frekvence v odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi excitovaným a některým níže položeným stavem kvantového systému. Přitom dochází k přechodu kvantového systému do tohoto energeticky chudšího stavu a současně je excitační energie uvolněna emitováním fotonu s energií $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ (h je Planckova konstanta). Podstatné je, že i ostatní vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi stimuloval. Toto je podstatou zesilování světla.

Obecný princip funkce laseru, jakožto celku, je následující: zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházel dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá kvantová soustava aktivního prostředí přejde náhodně spontánní emisí na nižší hladinu, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na spodní energetickou hladinu a emisi fotonů. Část fotonů se může kvantovými soustavami opět absorbovat. Pokud však bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin) bude se optické záření řetězovou reakcí zesilovat. Spontánní emise se stane zanedbatelnou vzhledem k emisi stimulované a generované záření nabude jednotné povahy, což znamená, že vycházející záření bude koherentní a monochromatické. Aby se zajistila směrovost laserového záření, formuje se aktivní prostředí do tvaru dlouhého válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Ten zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu systému – jen rezonující fotony se budou zesilovat. Její velikost lze nastavit tak, aby byla maximální pro laserový svazek požadovaných vlastností. Po dostatečném zesílení je laserový svazek z rezonátoru vyveden [30].



Obr. 2-14 Princip vybuzení elektronu, následná generace laserového svazku [30]

2.8.1.2 Typy laserů

Jak již bylo nadneseno na začátku této kapitoly týkající se laserů, tyto emitory mohou být děleny do skupin dle mnoha úhlů pohledu. Například dle principu emitace na kontinuální nebo pulsní, dle množství vysílaného výkonu od slabých až po výkonové, nebo dle vlnové délky emitovaného záření. Z konstrukčního hlediska se lasery dají také dělit, a to podle skupenství aktivního prostředí. Známe lasery pevnolátkové, kapalinové a plynné. Samostatně stojící skupinou jsou potom lasery polovodičové, též označované jako laserové diody.

Pevnolátkové lasery

Jak již název napovídá, řadíme sem všechny lasery, jejichž aktivní prostředí je pevné skupenství. To by ovšem znamenalo, že dle této definice do skupiny pevnolátkových laserů patří například i lasery polovodičové. Z toho důvodu je nutné tuto definici dále rozšířit a to tak, že do pevnolátkových laserů můžeme řadit jen opticky čerpané pevnolátkové iontové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří matrice, což jsou krystalické nebo amorfní izolanty, dopované příměsí vhodných iontů. Nejznámější představitel této skupiny je červeně zářící rubínový laser emitující na vlnové délce odpovídající červené barvě viditelného spektra.

Kapalinové lasery

Jako aktivní prostředí kapalinových laserů se až na výjimky používají opticky buzené roztoky organických barviv. Jejich široké fluorescenční spektrum umožňuje spojitě přeladovat vlnovou délku generovaného záření. Zajímavostí je, že k pokrytí celého spektra od 300nm po 1500nm je zapotřebí jen několik druhů těchto barviv. Nevýhodou je toxicita a malá životnost barviva.

Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů tvoří atomy (He-Ne laser), ionty (Ar laser), molekuly (CO₂ laser) či jejich směsi v plynné fázi. Tyto lasery pracují především v kontinuálním režimu. Pro jejich buzení se využívá široká škála fyzikálních a chemických procesů, kdy nejčastěji se budí pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu. Optické buzení se používá jen velmi zřídka. Plynové lasery se dále vyznačují vysokou účinností, ale bohužel jen malými výkony. Větší výkon lze získat zvětšením aktivního prostředí, ale takovýto laser je pak až příliš rozměrný. Nejznámějším zástupcem této kategorie je dozajista He-Ne a CO₂ laser.

Polovodičové lasery

Zdroje této skupiny jsou nejpoužívanějšími lasery v současnosti. Jejich hlavní rozdíl oproti předešlým skupinám je ten, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, nýbrž se u nich vyskytují elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásmem polovodiče. Laserový paprsek polovodičového laseru lze velmi snadno modulovat změnou budicího proudu. Tyto lasery mají opět velmi vysokou účinnost sahající až k 50%, dokáží pracovat jak v pulzním tak v kontinuálním režimu a jsou schopny dosahovat vysokých výkonů za relativně malých rozměrů. Jejich největší uplatnění je v telekomunikaci a také jako budiče pevnolátkových laserů.

2.8.2 LED

Zkratka LED pochází opět z angličtiny a znamená Light Emitted Diode, což se do češtiny překládá jako světlo vyzařující dioda, nebo též elektroluminiscenční dioda. První dioda byla vynalezena vědcem N. Holonyamem v roce 1962. Tato součástka pracuje na principu polovodičového P-N přechodu. Zjednodušeně lze říci, že pokud prochází polovodičovým přechodem elektrický proud v propustném směru, dochází k emisi nekoherentního světla s úzkým spektrem. Tento jev je nazýván elektroluminiscence. Pokud je napájení LED zapojeno v opačném směru, toto zapojení se označuje jako závěrný směr, skrz P-N přechod neprochází téměř žádný elektrický proud. Tím pádem ani samotná dioda neemituje záření. Proud procházející přechodem v propustném směru může nabývat hodnot od několika jednotek miliampér až po jednotky ampér u speciálních výkonových osvětlovacích diod. Následující tabulka ukazuje napětí na LED v propustném směru při protékajícím proudu 20 mA. Tyto hodnoty je nutno brát pouze orientačně, jelikož jsou závislé na mnoha faktorech jako například teplota, technologie výroby nebo typu použitých polovodičů.

Barva	Úbytek napětí
Infračervená	1,6 V
Červená	1,8 – 2,1 V
Oranžová	2,2 V
Žlutá	2,4 V
Zelená	2,6 V
Modrá	3,0 – 3,5 V
Bílá	3,0 – 3,5 V
Ultrafialová	3,5 V

Tab. 2-1 Hodnoty napětí na diodě v propustném směru pro dané barvy [25]

To, jaké spektrum vlnových délek bude dioda emitovat, záleží na chemickém složení P-N přechodu. LED dokáže vyzařovat vlnové délky od 380 nm, což odpovídá rozmezí mezi viditelným spektrem fialové barvy a spektrem ultrafialovým, přes celé viditelné spektrum až po LED emitující infračervené záření.

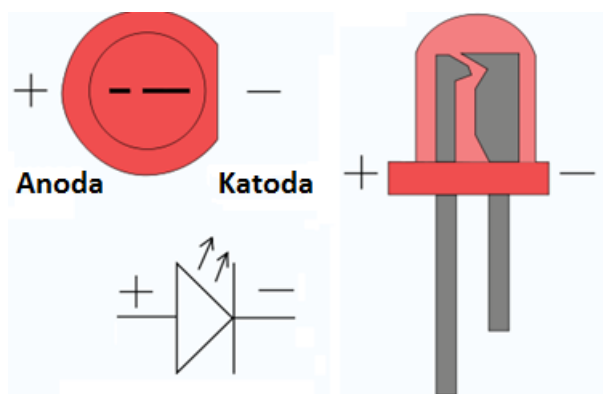
Z principu funkce LED plyne, že není schopna přímo vyzařovat bílé světlo. Dříve byl tento nedostatek kompenzován zabudováním trojice čipů do jednoho pouzdra. Každý z těchto čipů vyzařoval jiné barevné spektrum a při jejich vzájemném aditivním míšení docházelo k optickému vjemu bílého světla. Dnes se však volí jiný princip výroby bílých LED diod. V jednom pouzdře je pouze jeden čip, na něm je nanášena tenká vrstva chemické substance nazývané luminofor. Dioda začne emitovat záření, které začne procházet skrz luminofor a tím dojde ke změně spektra vlnových délek a výsledkem je vjem bílého světla. Pokud se využije LED emitující modré světlo, část tohoto záření je luminoforem transformována na světlo žluté barvy a díky míšení vzniká světlo bílé. Pokud místo modré použijeme LED ultrafialovou, luminofor toto záření transformuje přímo na bílé světlo.



Obr. 2-15 Výkonová LED společnosti Luxeon Emitter [18]

2.8.3 Konstrukce

Klasická konstrukce LED je znázorněna na následujícím obrázku. Základní monokrystalové diody bývají překryty kulovými vrchlíky, které jsou buďto z epoxidové pryskyřice, nebo akrylového polyesteru. To se dělá z toho důvodu, že materiály z nichž se LED vyrábí, mají velký index lomu a velká část vyzařovaného světla by se díky totálnímu odrazu vrátila zpět. Kontakty LED mohou být v provedení samostatných dlouhých vývodů, jak je znázorněno na obrázku nebo mohou být zapouzdřené (SMD).



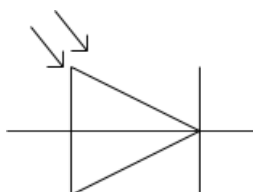
Obr. 2-16 Pohled na LED seshora, zepředu a její schématická značka [25]

2.8.4 Výhody LED

- Schopnost efektivnější přeměny elektrické energie na světelnou než u jiných osvětlovacích prvků (žárovky, zářivky)
- Schopnost vytvářet světlo v dané barvě bez nutnosti použití barevných filtrů
- Konstantní vyzařované spektrum nezávislé na přiváděném výkonu
- Celková odolnost vůči mechanickému poškození
- Netrpí poškozením při častém vypínání a zapínání zařízení (Stěžejní vlastnost pro aplikaci v optických komunikačních systémech)
- Doba nutná pro zahájení emitace je velmi krátká (v řádu stovek mikro sekund u běžných diod, u speciálních diod využívaných pro optickou komunikaci je tato doba o 2 řády nižší)
- Levná a jednoduchá výroba
- Absence jedovatých látek
- Vysoká životnost v porovnání s jinými zdroji záření v řádu statisíců hodin u běžných diod, u výkonových o řád nižší.

2.9 Fotodiody

Tak jako každá dioda, je i fotodioda součástka založená na principu polovodičového PN přechodu. Pokud na aktivní plochu nedopadá žádné záření, má fotodioda stejnou voltampérovou charakteristiku jako běžná dioda. Pokud však necháme na fotosensitivní oblast dopadat záření, můžeme pozorovat, jak dochází k lineárnímu růstu anodového proudu při rovnoměrném zvyšování osvětlení. Fotodioda se tedy chová jako pasivní součástka, jejíž elektrický odpor v závěrném směru je závislý na osvětlení. Reakce na změny osvětlení jsou velmi rychlé a dosahují hodnot v řádu 10^{-6} až 10^{-9} sekundy. Z konstrukčního hlediska pak dále rozlišujeme fotodiody lavinového typu a fotodiody typu PIN.



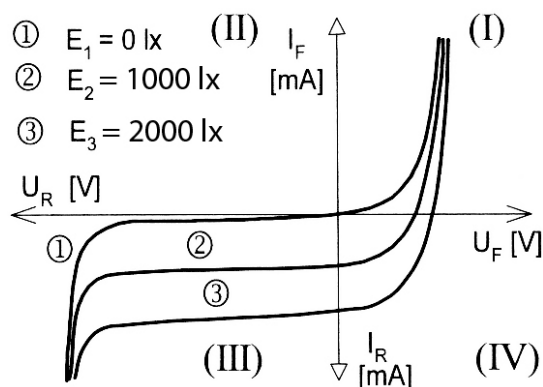
Obr. 2-17 Schématická značka fotodiody

2.9.1 Princip

Funkce fotodiody je založena na vnitřním fotoelektrickém jevu. Světelné záření reprezentované proudem fotonů je pomocí čoček fokusováno na malou plochu PN přechodu (fotosensitivní oblast). Foton narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu a předá mu svoji energii. Dojde k absorpci energie fotonu elektronem, tím získá elektron dostatek energie na to, aby opustil valenční pás a přesunul se do pásu vodivostního. Díky tomu, že elektron opustil své místo v atomu, vzniká dvojice volný elektron a díra. Volné elektrony se potom stávají volnými nosiči náboje, čímž přispívají ke zvýšení vodivosti daného materiálu, respektive snižují jeho elektrický odpor. Fotoelektrického jevu je například využíváno kromě fotodiody u fotorezistorů.

2.9.2 Voltampérová charakteristika fotodiody

VA charakteristika fotodiody prochází pouze I., III. a IV. kvadrantem, přičemž využívány jsou jen poslední dva jmenované. Ve III. kvadrantu pracuje fotodioda v odporovém (fotovodivostním) režimu a chová se jako rezistor citlivý na světlo. Ve čtvrtém kvadrantu pracuje dioda v hradlovém (fotovoltaickém) režimu, zde se dioda chová jako zdroj elektrické energie.



Obr. 2-18 Voltampérová charakteristika fotodiody[18]

2.9.3 Lavinová fotodioda APD (Avalanche photodiode)

Je velmi citlivý polovodičový fotodetektor. Při použití bývá předpnuta vysokým závěrným napětím řádu desítek až stovek voltů, často těsně pod průrazovým napětím, což umožňuje dosáhnout vysokého zisku 100 až 1000. V tomto režimu jsou elektrony a díry excitované dopadem fotonů urychlovány silným vnitřním elektrickým polem a podobně jako ve fotonásobičích generují další nosiče, čímž vzniká lavinový jev.

Tyto diody nacházejí svoje uplatnění v aplikacích s potřebou extrémní citlivosti, což je právě odvětví optických komunikací.

2.9.3.1 Princip funkce

Světlo dopadající na PN přechod způsobí vznik páru elektron-díra. Tento pár je díky silnému elektrickému poli transportován do lavinové oblasti fotodiody. Zde je urychlen na takovou rychlost, že kolize s krystalovou mřížkou způsobí vznik dalšího páru elektron-díra. Nově vzniklý pár je opět urychlen silným elektrickým polem a postupně, jakoby v řetězové reakci, vznikají další nové páry elektron-díra, čímž dochází k lavinovému efektu. Za určitých podmínek takto může i pouhý jediný foton vyvolat ionizaci krystalové mřížky vedoucí k lavinovému jevu (jedno-fotonová lavinová dioda).

2.9.3.2 Geigerův režim

Tohoto režimu je využito vždy, když je zapotřebí dosáhnout velmi vysokých zisků (v řádu statisíců až milionů). Princip spočívá v tom, že napětí přiložené na fotodiodě je nastaveno na hodnotu, která byt' jen o málo, převyšuje hodnotu průrazného napětí. V tomto stavu i jeden jediný pár elektron-díra způsobí velmi silný lavinový jev. Jakmile dojde k detekci prvního páru, je potom nutné okamžitě snížit napětí na diodě pod hranici průrazného napětí. Aby byla fotodioda schopna detekce dalších fotonů a nedošlo k jejímu proražení. Tohoto režimu se využívá nejvíce u satelitních spojů a také u experimentů zabývajících se čítáním fotonů.

2.9.3.3 Shrnutí vlastností fotodiody typu APD

- stonásobně vyšší citlivosti než u diody typu PIN
- princip zesílení je zdrojem šumu
- vyžadován výkonný a stabilní zdroj
- zesílení fotodiody je citlivé na změny teploty a napětí
- doba náběhu je srovnatelná s PIN (méně než 1ns)
- pro aplikaci nutné složitějších elektronických obvodů

2.9.4 Fotodiody typu PIN

Označení PIN evokuje zkratku polovodičového PN přechodu, jen písmeno I je nadbytečné. Toto písmeno symbolizuje vložení takzvané intrinsické vrstvy mezi polovodič typu P a typu N. Tato vrstva je charakteristická svou velkou elektrickou pevností a tím, že je minimálně dopována. Tento typ diody se projevuje jako takřka dokonalý rezistor pro radiové a mikrovlnné frekvence. Výhoda PIN spočívá v tom, že ochuzená oblast vznikající při vnitřním fotoelektrickém jevu, se takřka celá nachází v polovodiči typu I, který má konstantní šířku bez ohledu velikost předpětí na diodě, kdežto u normální diody se OPN (oblast prostorového náboje - místo přechodu) mění v závislosti na přiloženém napětí. Oblast I se dá vyrobit libovolně veliká a platí, že čím širší bude, tím větší bude místo určené pro generaci párů elektron-díra.



Obr. 2-19 Příklady komerčně používaných fotodiod

Shrnutí vlastností fotodiody typu PIN

- rozšíření ochuzené vrstvy (vrstva I mezi vrstvami polovodiče typu P a N) zvětšuje aktivní oblast příjmu fotonů a zmenšuje kapacitu přechodu
- zvyšuje průletovou dobu a tím negativně ovlivňuje - dobu náběhu
 - šířku pásma přenosu
 - přenosovou rychlost
- dosažitelné doby náběhu jsou v řádu desítek pikosekund
- typická proudová citlivost je 0,6 A/W
- materiály: AlGaAs/GaAs pro pásmo 850nm;
InGaAs/InP pro 1300nm až 1550nm;
HgCdTe/CdTe pro 3000nm až 17000nm;
InGaAsP/InP a GaAlAsSb/GaSb pro 920nm až 1700nm

Porovnání základních parametrů AVP a PIN fotodiod

	PIN	APD
Plocha diody A_{FD}	(0,1 – 10) mm ²	(0,1 – 10) mm ²
Zesílení G_{FD}	1	50 – 200
Proudová hustota za tmy J_{tma}	10 ⁻¹³ A/cm ²	10 ⁻¹⁴ A/cm ²
Šířka pásma přenosu B_m	5 GHz	5 GHz

Tab. 2-2 Porovnání základních parametrů AVP a PIN fotodiod

2.10 Satelitní optické spoje (SOP)

Jako první bylo s optickými spoji počítáno v oblasti kosmických programů ve smyslu náhrady za klasickou rádiovou komunikaci, která je velmi energeticky náročná, nemá tak velké komunikační rychlosti a celkově nedosahuje kvalitativních vlastností optické komunikace. Nevýhody, které OBS mají při používání na Zemi, jako je útlum prostředí nebo přímá viditelnost ve vesmíru ztrácí na významu. Satelitní optické spoje můžeme dále dělit do několika skupin podle druhu jejich nosiče (satelitu), přesněji řečeno podle jejich výšky a typu trajektorie oběhu.

LEO

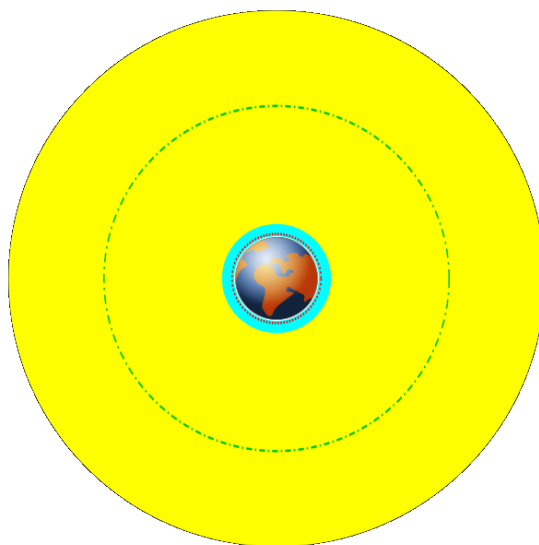
Satelity, které jsou Zemi nejbližší, obíhají ve výšce od 200 do 1200 km nad rovníkem. Pro takovéto satelity se vžil název LEO z anglického Low Earth Orbit. Nevýhodou těchto družic je fakt, že v nízkých výškách do 300 km se stále nachází zbytkové množství atmosféry, které má za následek tvoření třecích sil, jež stahují družice neustále blíže povrchu. To musí být kompenzováno jejím neustálým korigováním výšky, což je ovšem velmi energeticky náročné. Doba jednoho obletu Země LEO satelitu činí 80 až 130 minut v závislosti na operační výšce.

MEO

Satelity obíhající ve výškách označovaných jako MEO neboli Medium Earth Orbit, jsou využívané více než jmenované LEO. Jejich operační výška je 1200 - 35000 km a frekvence jejich oběhu je 4-6x denně. Mezi družice obíhající na střední orbitě patří například družice GPS.

GEO

Družice, jež krouží po kruhových drahách ve výšce 36000 km nad rovníkem jsou označovány zkratkou GEO podle Geo Earth Orbit. Družice v těchto výškách se pozorovateli ze Země jeví jako by byly nehybné a to proto, že právě tato výška zaručuje dobu oběhu 24 hodin. Z této charakteristiky vyplývá, že nejvhodnější použití družic na geostacionární dráze je například pro poskytování televizního signálu nebo signálu mobilních operátorů.



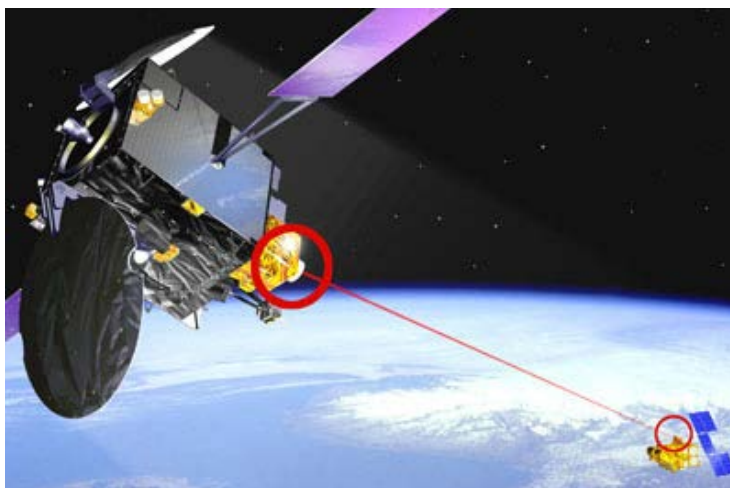
Obr. 2-20 Obrázek znázorňující jednotlivé orbity Země [18]

Modrá	Nízký orbit Země (LEO)	160 – 2000 km
Žlutá	Střední orbit Země (MEO)	2000- 35 000 km
Červené tečky	Výška oběžné dráhy ISS	500 km
Zelená čerchovaná čára	Oběžná dráha satelitů GPS	20 230 km
Černá čerchovaná čára	Geostacionární orbit Země (GEO)	35 794 km

Tab. 2-3 Tabulka znázorňující Zemské orbity s jejich výškami

2.10.1 Projekt SILEX

Tento projekt vznikl pod záštitou ESA (European Space Agency) jako experimentální ověření komunikace mezi dvěma satelity pomocí optického spoje namísto běžně užívané rádiové komunikace. První ze satelitů se nachází na geostacionární dráze a nese název ARTEMIS, což znamená Advanced Relay and Technology Mission Satellite. Druhý ze satelitů obíhá Zemi ve výšce 800 km, je to tedy družice LEO a je označován jako SPOT-4. Tato zkratka pochází z francouzštiny a reprezentuje Satellite Pour l'Observation de la Terre. Z technických parametrů je udáván typ laseru ve vysílači, což byl 800nm GaAlAs (Arsenit galio-hliníkový) a v přijímači byla použita lavinová fotodioda. Úspěšnému pokusu předcházelo velké množství nezdarů, které byly z velké způsobeny problémem v zaměřovacím softwaru na družicích. Vzhledem k tomu že každá z družic se nachází na jiné oběžné dráze, jsou i jejich rychlosti rozdílné, což klade velké nároky na výpočetní výkon jelikož spoj je nutné nasměrovat s velkou přesností pro optickou komunikaci. První úspěšný přenos mezi ARTEMIS a SPOT-4 proběhl v listopadu 2001. Dle dokumentů vydaných organizací ESA trval bezmála 19 minut a bylo dosaženo vysoké přenosové rychlosti 50Mbit/s, přičemž chybovost BER nebyla horší než 10^{-9} .



Obr. 2-21 Animace optické komunikace mezi družicemi ARTEMIS a SPOT-4 [17]

2.10.2 Projekt KIRARI

Úspěch a zároveň i primát v této oblasti pro Evropskou kosmickou agenturu vyvolal ve světě závody v dosažení první komunikace pomocí optického spoje, mezi družicí a pozemní stanicí. Prvních úspěchů dosáhl Japonský vesmírný program známý pod zkratkou JAXA, který vypustil experimentální družici KIRARI OICETS (LEO), která obíhá ve výšce 610km nad povrchem. Tento přenos byl úspěšně uskutečněn v prosinci roku 2005. O 4 měsíce později, tedy v březnu 2006, spojila Japonská JAXA síly s Indickými softwarovými vývojáři z NICT a podařilo se jim provést první komunikaci mezi satelitem OICETS na nízké oběžné dráze (LEO) a pozemní stanicí umístěnou v Japonském Tokiu. Vyvinutý software pro zachycení a sledování pohybujících se stanic byl pojmenován APT (Acquisition, Pointing and Tracking system) a jeho modifikace jsou používány pro zaměření satelitů dodnes.

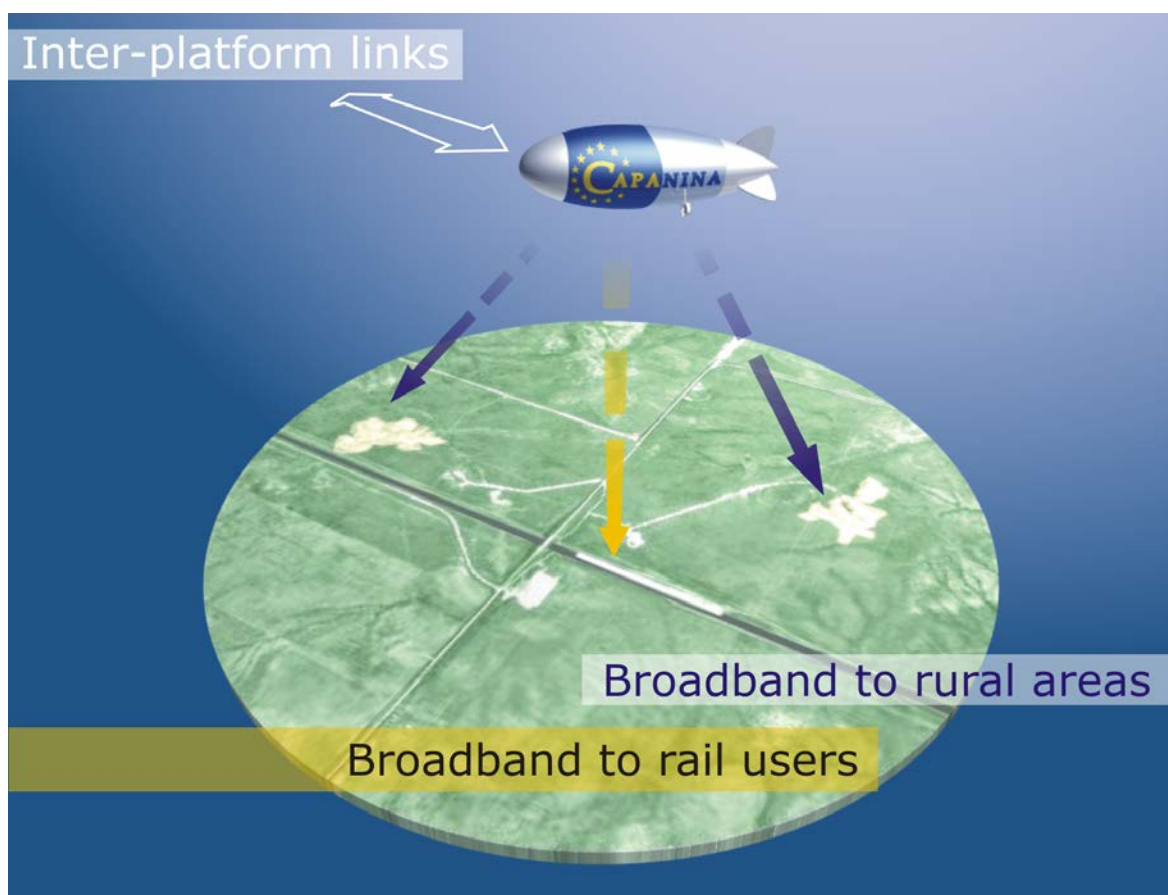
Nutno říci, že prvenství v komunikaci mezi základnou na zemi a družicí pomocí optického svazku patří Americkým vědcům, avšak jejich experiment spočíval v komunikaci s družicí ARTEMIS umístěné na geostacionární dráze. Takováto komunikace vyžaduje dozajista hodně výkonný vysílač a citlivý přijímač, jelikož optický svazek putuje na vzdálenost 32 tisíc kilometrů přes všechny vrstvy atmosféry. Zásadní rozdíl je však v tom, že družice nemění na obloze svou pozici, takže odpadá problém se složitým zaměřováním paprsku. Z tohoto důvodu je prvenství přičítáno právě Japonskému vesmírnému programu. Další milník byl pokořen v prosinci 2006, kdy se pomocí značných vylepšení systému APT podařilo navázat komunikaci mezi družicí ARTEMIS (GEO) a letounem letícím ve výšce 10km nad povrchem Země.



Obr. 2-22 Animace komunikace družic ARTEMIS (GEO) a OICETS (LEO) [5]

2.10.3 Projekt CAPANINA

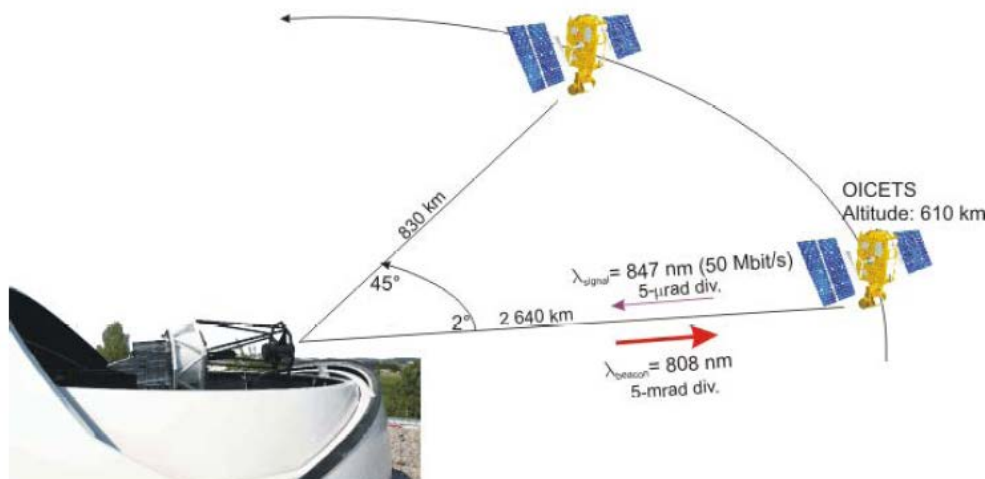
Tento projekt z roku 2005 byl veden pod záštitou německé výzkumné organizace DLR. Objektem experimentálního testování bylo ověření funkčnosti páteřní sítě nesené na meteorologickém balónu či vzducholodi. Tyto nosiče jsou označovány jako HAP (High Altitude Platform) a pohybují se v nadmořské výšce 20 km nad zemí. To je dostatečná výška pro to, aby se vyhnuli kontaktu s jakýmkoliv letadlem a zároveň dostatečně nízká, aby nadále setrvala ve stratosféře z důvodu minimalizace vlivu turbulencí. HAP poskytovala uživatelům připojení do sítě rychlostí 120Mbit/s, což když si uvědomíme, že mluvíme o roku 2005, kdy průměrná rychlost internetu pro domácnosti či malé firmy se pohybovala v rozmezí 256-512kbit/s, byl opravdu obrovský skok kupředu. Mezi další výhody tohoto řešení byla velikost oblasti, kterou HAP dokázal svým signálem pokrýt. Cílem bylo pokrýt signálem i ty oblasti, kam by se klasickou kabelovou cestou vedl velmi obtížně. V plánu byla možnost poskytování služeb pro hromadnou dopravu. Co se týče technické vybavenosti, komunikace probíhala na 1550nm, maximální naměřená hodnota datového toku byla 1,25 Gbit/s, přičemž chybovost BER nebyla vyšší než hodnota 10^{-9} a vysílaný optický výkon byl 100mW. I přes sebelepší parametry spoje se však takovýto způsob poskytování připojení do sítě na poslední míli neuchytil a to především z hlediska finanční náročnosti. Cena stratosférického balónu, vysílací soustavy a přijímací soustavy tomuto projektu zlomila vaz.



Obr. 2-23 Princip fungování projektu CAPANINA [6]

2.10.4 Projekt KIDO

Tento projekt byl veden pod záštitou dvou státních organizací. Pracovala na něm Japonská JAXA a Německá DLR. Cílem bylo uskutečnit přenos mezi družicí na nízké oběžné dráze a pevnou pozemní stanicí vybudovanou poblíž Berlína. Stejná věc již byla otestována v rámci projektu KIRARI, avšak zde šlo o použití zaměřovacího systému fungujícím na úplně jiném principu, než byl Indický APT. Hlavní oblastí zájmu, bylo porovnat výsledky měření při pokusu o spojení při různých hodnotách úhlu inklinace. V tomto experimentu bylo dosaženo rychlosti přenosu 50Mbit/s při použití ON/OFF modulace při komunikaci pomocí 100mW laseru pracujícího na vlnové délce 847nm. Pokus ukázal, že navržený software pracuje poměrně dobře, avšak kvalit zaběhnutého APT nedosahuje, jelikož průměrná chybovost byla o 3 řády vyšší než u APT. Vědcům se z celkových osmi pokusů povedlo navázat spojení celkem pětkrát. Ve zbylých 3 případech byl nezdar způsoben silnou přechodnou oblačností na optické trase.



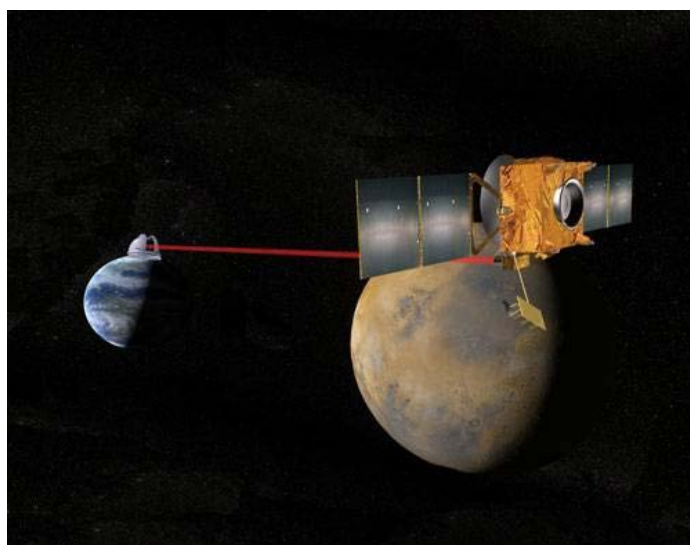
Obr. 2-24 Princip experimentu KIDO [5]

2.10.5 Projekt MOND

Jde o další experiment DLR ve spolupráci s Carl-Zeiss Optronics, který měl ověřit možnost nepřetržité komunikace mezi pohybujícím se pozemním přijímačem a běžnou pozemní základnovou vysílací stanicí. Pro maximální objektivitu testování byl přijímač umístěn na střechu auta, které jezdilo skrze značně členitý terén a náhle měnilo směr své jízdy. Auto v sobě mělo zabudovaný GPS vysílač, který udával aktuální zeměpisnou polohu a tyto informace předával softwaru APT. Komunikace probíhala pomocí laseru pracujícího na 1550nm a rychlost přenosu činila 1,5Gbit/s. Výsledek tohoto experimentu byl veskrze kladný. Komunikace mezi vysílačem a přijímačem probíhala naprosto korektně, s velmi dobrou hodnotou BER. Dále se zde ověřila funkčnost speciálního kanálového kódování, které umožňovalo nepřerušování komunikace ve chvíli, kdy se mezi vysílač a přijímač dostala na krátký časový úsek nějaká překážka.

2.10.6 Projekt MTO

Tento projekt měl být jeden z nejnákladnějších investic z oblasti optické dálkové komunikace vůbec, kde na jeho rozpočet bylo vyhrazeno 500 miliónů dolarů. Měl být veden pod záštitou Americké kosmické agentury NASA a spočíval ve vyslání sondy k planetě Mars, jejímž prvořadým úkolem je zajištění takřka nepřetržité komunikace mezi družicí a Zemí (jde o tzv. spojení planet-to-planet). Z hlediska této diplomové práce je na tomto projektu zajímavé to, že na družici měl být nainstalován vysoce výkonný laser, který měl sloužit k experimentálnímu použití na dálkovou komunikaci, jakožto alternativa ke klasickému mikrovlnnému spojení. Odhadovaná životnost této družice má být asi 10 let a každý den jejího pobytu na oběžné dráze Marsu má na zemi posílat gigabity dat. NASA však nemá žádné zkušenosti s tím, jak se bude projevovat optický svazek na vzdálenosti milionů kilometrů a jestli bude mít ve výsledku dostatečný výkon na to, aby překonal naši Zemskou atmosféru a tím i její turbulence. Projekt nakonec ztroskotal na nedostatku financí. NASA sice měla oněch 500 miliónů dolarů, avšak ty byly použity na neodkladné opravy jiných vesmírných objektů, jež nesly vyšší prioritu. NASA se však s touto myšlenkou zaobírá dále a ve svých dlouhodobých plánech uvádí předpokládané vypuštění typově podobné (vylepšené) družice směrem k Marsu v roce 2013.



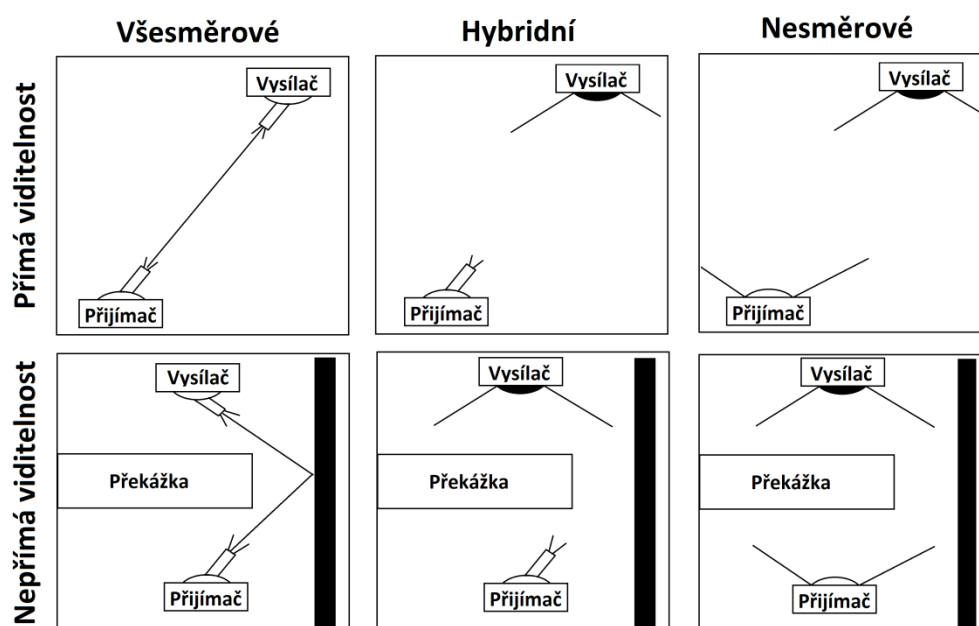
Obr. 2-25 Komunikace pomocí optického svazku mezi družicí MTO a Zemí [16]

2.11 Optický indoor spoj

Touto kapitolou se dostáváme ke stěžejní části diplomové práce, a to k optickým spojům realizovaných uvnitř budov. Myšlenka použití optické bezdrátové sítě v budově namísto klasických kabelových propojení, nebo použití rádiové bezdrátové sítě tu byla již od roku 1980. V těchto letech to však byla záležitost pouhých laboratorních testů, a k praktické aplikaci měla daleko. Když se však přeneseme do současné doby, aplikace optických bezdrátových sítí uvnitř budov se stává čím dál tím více populární a rozšířenou alternativou. To je zapříčiněno neustálým snižováním cen v oblasti optických komponent na úroveň, kde se tato cena vyrovnává cenám klasických kabelových nebo radiových spojů.

2.12 Principy šíření

Na základě existence přímé a nepřímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem (v angličtině označované zkratkou LOS – Line Of Sight) a na směrovosti přijímače a vysílače, byly definovány kategorie spojení pro indoor bezdrátové spoje. Jak je ukázáno na následujícím obrázku, máme celkem 6 základních konfigurací.



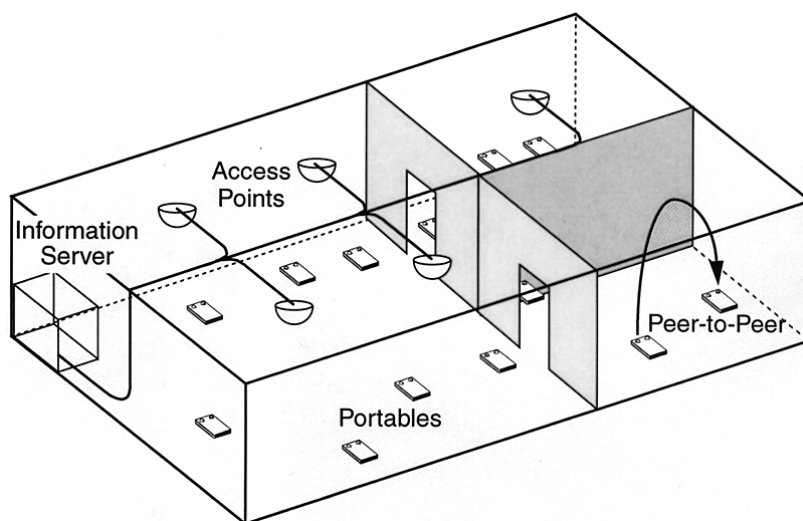
Obr. 2-26 Princip šíření optického svazku

Systémy pracující na principu přímé viditelnosti jsou z energetického hlediska daleko efektivnější a také zkrácení vícecestným šířením je daleko menší než u systémů s nepřímou viditelností. Naproti tomu systémy s nepřímou viditelností zvyšují pomyslnou použitelnost a robustnost takového spoje. Dokáží totiž fungovat i za situace, kdy je mezi vysílačem a přijímačem umístěna překážka. Další výhodou je odpadající potřeba přesného zaměření vysílače a přijímače, tudíž se s těmito komponenty může v rámci jakési tolerance hýbat.

V případě přímé viditelnosti u směrového spoje je energetická účinnost nejvyšší, jelikož celkový vyslaný výkon je koncentrován do úzkého optického svazku, což umožňuje použití přijímače s malou přijímací plochou. Tento systém netrpí neduhy vícecestného šíření a předem daná maximální délka, na kterou spoj dokáže pracovat pro daný optický výkon, je vždy stejná, jelikož je naprosto nezávislá na tvaru či velikosti místnosti a odrazivosti jejích stěn. Nevýhodou je nutné velmi přesné zaměření vysílače a přijímače.

Pokud se zaměříme na hybridní systém s nepřímou viditelností, je jasné, že si dokáže poradit s překážkou blokující přímou viditelnost a navíc zaměřování přijímače je podstatně jednodušší než v předešlém případě. Záporem je však spotřeba většího množství energie vysílače díky všesměrovému vysílání.

Ze zmíněných konfigurací je nejvíce atraktivní všesměrová v kombinaci s nepřímou viditelností. Tato konfigurace se zkráceně nazývá difúzní. Jak již předchozí věta napovídá, systém nepotřebuje přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, jelikož je záření rozvedeno dle potřeb třeba až po celé místnosti díky možným odrazným vlastnostem stěn a stropu. Stejně tak si tato konfigurace díky všesměrovému šíření poradí i s překážkou v cestě přímé viditelnosti. Tyto klady z ní dělají nejsilnější a zároveň nejflexibilnější konfiguraci ze všech. Do záporů je nutné zařadit problémy s vícecestným šířením a podstatně větší optické ztráty než u hybridních a směrových systémů.



Obr. 2-27 Principiální návrh použití optické bezdrátové sítě v budově [12]

2.13 Bezdrátová indoor komunikace pomocí infračerveného světla

Když se začalo uvažovat nad alternativním, bezpečnějším, ale zároveň stejně rychlém bezdrátovém komunikačním prostředku, zdálo se býti nejlepším řešením používat k těmto účelům optických komponent pracujících v infračervené spektrální oblasti. Tyto systémy mají mnohé výhody, do kterých můžeme zařadit velkou šířku pásma, žádné interference s rádiovým vysíláním a především jde o nelicencované pásmo, což umožňuje využívat celou jeho šířku zcela zdarma. Použití IR spektra je dále vhodné kupříkladu díky odrazovým vlastnostem, kdy je pohlcováno tmavými povrchy, difúzně odráženo od povrchů světlých a přímo odráženo povrchy lesklými. Stejně tak jako záření z oblasti viditelného spektra dokáže projít skrze sklo, nikoli však skrze zeď, nebo jinou pevnou překážku, čímž je zaručeno zabezpečení dané sítě v rámci jedné místnosti nebo patra. Aby bylo zamezeno šíření záření mimo místnost skrze například okna, je nutné sklo potáhnout speciální nepropustnou nebo odraznou fólií. Výhody v oblasti konstrukce vysílače a přijímače jsou také zřejmé. Komponenty pro IR pásmo typicky malých rozměrů, jejich cena je v porovnání s ostatními nízká a spotřebovávají jen velmi malé množství energie. Následující tabulka popisuje výsledky experimentů světových laboratoří pro přenos dat pomocí infračerveného záření.

Rok	Společnost	Konfigurace	Bitová rychlost	Charakteristika
1981	IBM	Diffuse	64-125 kb/s	100 mW, 950 nm, BPSK
1983	Fujitsu	LOS	19.2 kb/s	15 mW, 880 nm, FSK
1985	Hitachi	Hybrid	0.25-1 Mb/s	300 mW, FSK
1986	Motorola	Wide LOS	50 kb/s	16 mW, 950 nm, RZ ook
1987	Bell Labs	Directed LOS	45 Mb/s	1 mW, 800nm, OOK
1988	Matsushita	Hybrid	19.2 kb/s	880 nm, FSK
1992	MPR	Non-Directed	230.4 kb/s	800/950 nm, DPSK
1993	BT Labs	Cellular	50 Mb/s	-
1994	Barkley	Diffuse	50 Mb/s	475 mW, 806 nm, OOK
1994	BT Labs	Cellular	155 Mb/s	40 mW

Tab. 2-4 Chronologie výzkumu optické indoor komunikace v pásmu IR [14]

Všechny tyto experimenty však byly prováděny na vzdálenost maximálně 1 metr. V případě posledního zmiňovaného experimentu z roku 1994 na vzdálenost pouhých 40 centimetrů, což je pro běžné použití v komerční sféře nedostatečné. Praktického použití se komunikace v infračerveném spektru se dočkala v 90. letech, kdy byla stěžejním komunikačním prostředkem mezi kapesními počítači, a v té době čím dál víc se rozvíjejícími technologiemi mobilních telefonů. Limitace takového přenosu dat však byly značné. Jednak byla bitová rychlost těchto přenosů velmi nízká. V roce 1994 byl schválen první standard označovaný jako IrDA 1.0, který byl mimo jiné charakterizován přenosovou rychlostí v rozmezí od 2400 bit/s do 115200 bit/. Další nevýhodou byla malá komunikační vzdálenost v řádu desítek centimetrů. Dříve jmenovaný standard IrDA 1.0 hovoří o vzdálenosti 1 metr, v praxi se však ukázala jako příliš velká a docházelo při ní k přerušování komunikace a zhoršování BER. Proto se od této komunikační metody v mobilních zařízeních začalo pomalu upouštět, až byla nakonec úplně nahrazena rádiovou technologií Bluetooth, jejíž výhody v dostatečné přenosové rychlosti a nezávislosti na přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem,

převýšily nedostatky v oblasti vyšší energetické náročnosti a větší šanci na odposlech a rušení. Dnes je IČ technologie v mobilních zařízeních zastoupena pouze v zařízeních PDA, díky jejich alternativnímu použití jako dálkových ovladačů. To se ovšem dostáváme do jiné oblasti, než bylo zamýšleno. Zpět tedy ke komunikaci v pravém slova smyslu.

	Rádiové vlny	Infračervené záření
Regulované pásmo	Ano	Ne
Bezpečnost	Možná	Velmi vysoká
RF interference	Ano	Ne
Cena technologie	Proměnná	Poměrně nízká
Pokrytí	Střední	Malé
Mobilita	Ano	Jen určité konfigurace
Omezení šířky pásma	Regulátory	Fotodetektor, zesilovač
Vícecestné šíření	Ano	Jen určité konfigurace
Ztráty šířením	Velké	Velké
Hlavní zdroj šumu	Interference s dalšími RF	Okolní světlo

Tab. 2-5 Porovnání RF a IČ metody pro bezdrátovou komunikaci [12]

To, že se upustilo od datové komunikace v infračerveném spektru mezi mobilními zařízeními, neznamená, že se od něj upustilo ve všech oblastech. Díky vývoji technologií byl zanedlouho po IrDA 1.0 definován standard IrDA 1.1, který jakožto nadstavba verze 1.0 obsahoval mimo jiné i nejpodstatnější rozšíření přenosových rychlostí až po 4 Mb/s. Taková to rychlost se dá již zvažovat jako dostatečná pro potřeby jednoduché počítačové sítě v komerční sféře. Aktuálně k dnešnímu datu je v platnosti nejnovější standard IrDA 1.4, který bývá označován jako VFIR. V něm je definovaná přenosová rychlost až na 16 Mb/s při použití tzv. ON/OFF klíčování. Pro tuto diplomovou práci je nejpodstatnější vznik standardu označovaného jako AIR, který definuje principy fungování optické všesměrové bezdrátové sítě s dosahem až 8 metrů. V roce 2011 má přijít na světlo světa nový standard IrDA 1.5, který slibuje opětovné navýšení přenosových rychlostí jak pro spoje Point-to-Point, tak i pro bezdrátové všesměrové sítě.

Verze	Typ komunikace	Dosah	Datová rychlost	Modulace
1.3	Point-to-Point	1 m	2,4-115.2 kb/s	RZ – 3/16
1.3	Point-to-Point	1 m	576 kb/s 1152 kb/s	RZ-1/4 RZ-1/4
1.3	Point-to-Point	1 m	4 Mb/s	4-PPM
VFIR/1.4	Point-to-Point	1 m	16 Mb/s	OOK
AIR	Network	4 m 8 m	4 Mb/s 250 kb/s	
UFIR	Point-to-Point	1 m	100 Mb/s	HHH

Tab. 2-6 IrDA Standardy pro datové přenosy [12]

Jestliže je v řešení nedostatečná komunikační vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, přichází v úvahu jednoduché řešení ve formě zvýšení výkonu vysílacího prvku. Dojde tím k nárůstu spotřebované energie, ale spoj bude fungovat na podstatně větší vzdálenost. Problém je ovšem v účincích infračerveného záření na člověka, což je předmětem popisu další kapitoly.

2.13.1 Vliv infračerveného záření na člověka

Ve všech vědních oborech platí, že zdraví člověka je vždy na prvním místě, a to platí i pro plánování optických bezdrátových sítí. Proto, aby bylo zdraví člověka ochráněno, v tomto případě jde nejvíce o lidský zrak, je nutné omezit výstupní výkon emitujících zdrojů na takovou úroveň, aby bez jakýchkoliv ochranných prostředků byl zdroj pro člověka neškodným. Infračervené záření, v závislosti na jeho vlnové délce, je schopno proniknout až 1 cm pod kůži člověka. Tohoto efektu je cíleně využíváno například u infralamp či infrasaun. Naproti tomu, zasáhne-li záření oko, dochází zde k narušení nitroočních struktur a tím může dojít k jeho nenávratnému poškození rohovky i sítnice. Proto není možné zvyšovat libovolně výkon těchto zdrojů záření. Řešením je používání ochranných brýlí, ale představa toho, že lidé sedící v kanceláři, vykonávající běžnou práci jsou nuceni používat neustále ochranné brýle, je dosti nereálná. Velikost poškození závisí na celkové době, po kterou bylo oko záření vystaveno, na vlnové délce záření a na celkovém vysílaném výkonu. Limity pro maximální vysílaný výkon jsou stanoveny mezinárodní elektrotechnickou komisí (EIC – International Electrotechnical Commission), která také popisuje maximální přípustné hranice expozice (AEL – allowable exposure limits). Tyto AEL zajišťují, že systém je bezpečný za všech okolností, které mohou nastat, i při nesprávném použití.

Například lasery, jsou zdrojem velmi úzkého koherentního záření a jejich výstupní výkon musí být redukován na určitou úroveň, pokud má tento laser splňovat určitý standard do kategorie bezpečných zdrojů. Pro zdroje laserového záření platí následující tabulka.

	1550 nm	1310 nm	880 nm
Třída 1	< 10 mW	< 8.8 mW	< 0.2 mW
Třída 2	Aplikuje se pouze na zdroje pracující ve viditelném spektru		
Třída 3A	10 – 50 mW	8.8 – 45 mW	1 – 5 mW
Třída 3B	50 – 500 mW	45 – 500 mW	5 – 500 mW

Tab. 2-7 Bezpečnostní třídy [10]

Produkty spadající do třídy 1 jsou definovány jako naprosto bezpečné, což znamená, že i přímý pohled do paprsku nedokáže lidskému oku nikterak ublížit. Tato třída je tou, do které musí spadat všechny zdroje, které mají být použity jakožto komponenty bezdrátového optického spoje. LED diody, díky svým vlastnostem, nepatří do skupiny laserů, mají širokou vyzařovací charakteristiku (poloviční úhel vyzařování je 30°) a tudíž jejich výkon, který mohou vyzařovat, aby splnili limity AEL, může být větší. Z tohoto důvodu a také cena, dělá z LED diod preferovaný optický zdroj pro indoorové bezdrátové systémy. Velkou výhodou je, že k zvýšení vysílacího výkonu lze použít, namísto jedné velmi výkonné LED diody, takzvané pole diod. Zde nedochází k prostému matematickému součtu výkonů jednotlivých vysílacích prvků, ale je nutné experimentálně ověřit nárůst výkonu při použití tohoto pole.

2.14 Bezdrátová indoor komunikace v UV spektru

Ultrafialové záření (UV) je druh elektromagnetického vlnění objeveného na počátku 19. století J. W. Bitterem. Toto vlnění je charakterizováno vlnovou délkou kratší než u viditelného spektra světla, ale s delší než u rentgenových paprsků. Vlnová délka tedy odpovídá intervalu 10 až 400nm, čemuž odpovídá energie 3 až 124eV. V některých publikacích bývá také označováno jako tzv. „Dolní část optického záření“, které je dále tvořeno viditelným světlem, které je definováno vlnovou délkou 400 - 790nm, a infračerveným zářením s vlnovou délkou od 790nm až po 3mm.

Při bližším pohledu na UV pásmo, jsme schopni ho dále rozdělit na několik dalších podkategorií.

Název	Zkratka	Vlnová délka [nm]	Energie fotonu [eV]
Ultrafialové A, černé světlo	UVA	400 nm–315 nm	3.10–3.94 eV
Blízká oblast (Near)	NUV	400 nm–300 nm	3.10–4.13 eV
Ultrafialové B	UVB	315 nm–280 nm	3.94–4.43 eV
Střední oblast (Middle)	MUV	300 nm–200 nm	4.13–6.20 eV
Ultrafialové C, baktericidní	UVC	280 nm–100 nm	4.43–12.4 eV
Vzdálená oblast (Far)	FUV	200 nm–122 nm	6.20–10.2 eV
Vakuum (Vakuum)	VUV	200 nm–100 nm	6.20–12.4 eV
Nízká oblast (Low)	LUV	100 nm–88 nm	12.4–14.1 eV
Super (Super)	SUV	150 nm–10 nm	8.28–124 eV
Extrémní (Extreme)	EUV	121 nm–10 nm	10.2–124 eV

Tab. 2-8 Rozdělení UV spektra

Vakuové záření je plně pohlcováno vzduchem, dokáže se šířit pouze ve vakuu. Ultrafialové záření je emitováno tělesy, jež jsou zahřátá na velmi vysokou teplotu. Mezi taková tělesa řadíme například elektrický oblouk nebo slunce. UV se dále řadí do neionizující radiace, což znamená, že může v interakci s ostatními látkami způsobovat různé chemické reakce. Nejznámějším projevem je zřejmě známé světélkování nebo fluorescence.

V naší atmosféře se však nenachází všechny složky UV záření. Díky pohlcení záření na molekulách kyslíku, vodních par a také díky ozónu, se zde nevyskytuje extrémní a částečně i krátkovlnná složka UV. Kupříkladu paprsky v rozmezí 175 až 290nm jsou zcela pohlcovány ozónem, jehož obsah v atmosféře se ale během posledních desetiletí značně snížil v důsledku působení člověka.

Velikost rozptylu se zvětšuje s klesající vlnovou délkou – pro srovnání: UV záření je v ovzduší rozptylováno téměř 100krát více než IČ (proto dochází k modravému zbarvení oblohy). V UV oblasti může rozptýlené záření dosáhnout i více než 50 % z celkového záření.

Každé prostředí totiž pohlcuje záření různých vlnových délek různě. Například obyčejné okenní sklo tloušťky 3mm pohlcuje UV záření s různou vlnovou délkou dle následující tabulky

Vlnová délka [nm]	10-300	320	340	360	380
Propustnost [%]	1,5	8	64	83	88

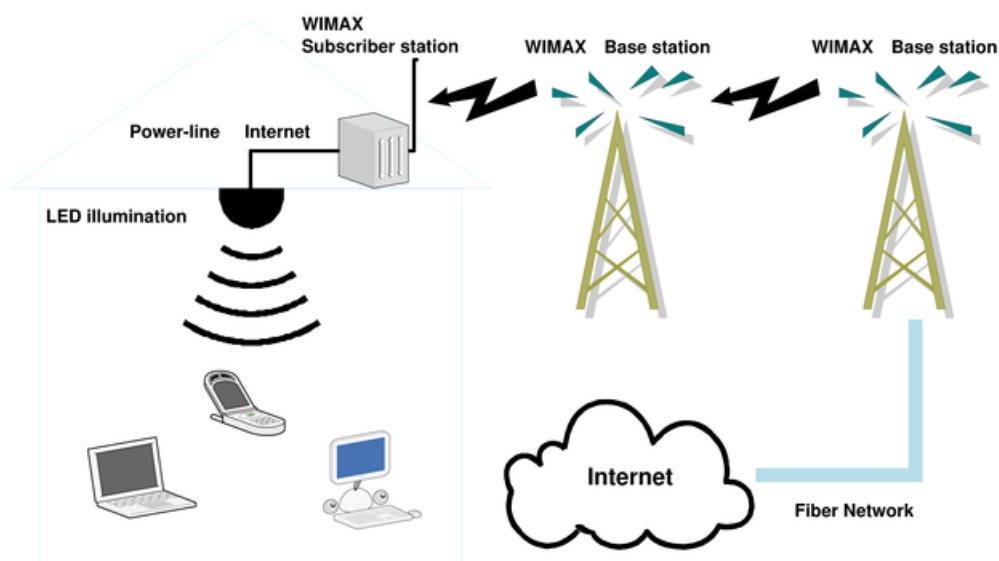
Tab. 2-9 Závislost propustnosti skla na vlnové délce záření

Již dlouhou dobu existují mnohé projekty, z nichž některé byly i realizovány, ve kterých se využívá výkonových UV zářičů, které, díky výborným rozptylovým a odrazovým vlastnostem UV světla, jsou schopny pokrývat velkou plochu signálem. Využití například v pokrytí měst internetem se jeví jako výborný nápad, ovšem vše je teprve ve fázi testování

2.15 Bezdrátová indoor komunikace ve viditelném spektru (VLC)

V současné době se přechází z infračervené oblasti do oblasti viditelného světla. Myšlenka je taková, že by se dala zkombinovat 2 zařízení v jeden fungující celek. Využít výkonové LED diody, jakožto osvětlovacího prvku například někde v kancelářských prostorách, a přitom využívat jejího záření za použití vhodné modulace ke komunikaci, se jeví jako naprosto brilantní nápad.

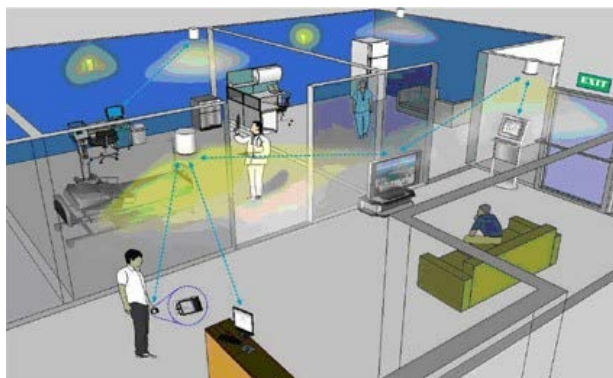
První ukázkou takovéto komunikace předvedl japonský vědec Toshihiko Kominé v roce 2004. O rok později byla tato technologie experimentálně použita v japonských nemocnicích a rychlost přenosu dosahovala několika megabitů za sekundu. Po tomto experimentu nastal ve světě obrovský zájem o tuto technologii. Vývoj nezádržitelně pokračoval a v roce 2007 spatřil světlo světa první standard s názvem JEITA. V roce 2010, proběhl v Německu experiment, kde přední výzkumné instituce v čele s laboratořemi Siemens demonstrovaly pokrok ve výzkumu VLC technologie. Na vzdálenost 5 metrů byli schopni komunikovat rychlostí 500 Mb/s, což je daleko rychlejší než v současnosti s používanou Wi-Fi (150 Mb/s). Při použití pětice diod a zvětšení vzdálenosti se rychlost pohybovala na úrovni 100 Mb/s. V Japonsku se experimentálně povedlo komunikovat na vzdálenost v řádu stovek metrů.



Obr. 2-28 Ukázka propojení technologie WIMAX s VLC [11]

Výhodou je, že většina technologií pro komunikaci na viditelných vlnových délkách je již vymyšlená a tudíž jde jen o způsob, jak vhodně je vhodně spojit. K dalším výhodám realizace takového systému patří nízké náklady na výrobu, energetická nenáročnost, a vysoká spolehlivost z toho hlediska, že se tyto systémy skládají z velkého množství diod, čili porucha jedné diody nezpůsobí nefunkčnost komunikace. Ambice této metody jsou veliké, plány na její zavedení zvažují například velké obchodní řetězce a restaurace. Navíc je výzkum mohutně podporován ze stran světových organizací, jelikož jde o metodu daleko šetrnější k člověku a přírodě oproti rádiovým spojmům nebo komunikaci v IČ nebo UV pásmu. Dle prognostiků se

stane VLC technologie do deseti let plnohodnotnou alternativou k RF technologiím pro domácí použití.



Obr. 2-29 Ilustrace použití VLC v kancelářských prostorech[11]

Spektrální oblast	Výkon vysílače	Poloviční úhel vyzařování	Vzdálenost	Plocha detektoru	LOS Přijatý výkon	LOS ztráta šířením	NLOS přijatý výkon	NLOS ztráta šířením
Infračervené (850 nm)	3,2 mW	6°	1,8 m	0,81 cm ²	2,0 μW	32 dB	0,45 μW	38,5 dB
UV (375 nm)	1,2 mW	5°	1,8 m	0,81 cm ²	1,1 μW	30,4 dB	0,015 μW	49,0 dB
Viditelné (470 nm)	2,6 mW	7,5°	1,8 m	0,81 cm ²	1,0 μW	34,1 dB	0,05 μW	47,2 dB

Tab. 2-10 Porovnání útlumů pro zadané spektrální oblasti [12]

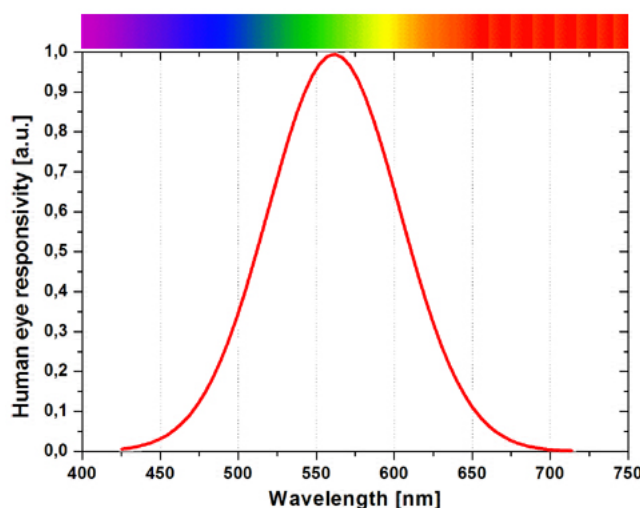
Jak je patrné z předchozí tabulky, nelze jednoznačně určit, která spektrální oblast je pro bezdrátovou optickou komunikaci nejlepší. Pokud navrhovaný spoj spadá do skupiny, kde existuje přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem (LOS – Line Of Sight) vychází nám nejlépe ultrafialová spektrální oblast, kde je ztráta šířením 30,4 dB. Na pomyslném druhém místě je oblast infračerveného záření s útlumem 32 dB a poslední je oblast viditelného spektra s 34,1 dB útlumu. Tyto hodnoty jsou však dosti vyrovnané a proto si dovoluji tvrdit, že na takto krátkou vzdálenost jsou jednotlivá spektra rovnocenná. Pokud však změním požadavek z přímé viditelnosti na nepřímou, čili šíření odrazem (NLOS – Non-Line Of Sight), vhodnost výběru spekter se značně změní. Nejlepší oblast pro LOS se jeví jako nejhorší pro NLOS. Je to dáno vlastnostmi tohoto záření a jeho pohlcováním na skle, horší odrazivosti atd. Pro komunikaci v UV spektru na vzdálenost 1,8 metru činí celkový útlum šíření 49 dB. Na druhé pozici je oblast viditelného světla s útlumem 47,2 dB a nejlépe si vede infračervená oblast s útlumem prostředí 38,5 dB. Zde se již nedá tvrdit, že mají všechna spektra rovnocenné postavení. Dalo by se říci, že UV a oblast viditelného světla jsou na tom dosti podobně se svými útlumy, ovšem infračervená oblast s útlumem menším o 10 dB zde jasně dominuje.

3 Návrh optického vysílače a přijímače

3.1 Úvod

Touto kapitolou dochází k definitivnímu opuštění teoretické části a přechodu na část praktickou. Pro diplomovou práci jsem zvažoval, ve které spektrální oblasti bych chtěl svůj spoj realizovat. Díky současnému trendu a rozvoji komunikace v oblasti viditelného spektra, by bylo jistě logickým krokem navrhnout takový výrobek, který by plnil jednak funkci osvětlení místnosti, tak i bezdrátového komunikačního modulu. Výhody takovéto realizace jsou zmíněny v kapitole 2.15. Ovšem takováto práce již byla na fakultě řešena, a proto jsem musel od nápadu s VLC upustit. Na výběr tedy zůstává UV pásmo, infračervená oblast nebo zvolit jednu vlnovou délku z viditelného spektra. UV spektrum je dozajista velmi zajímavé a do budoucna perspektivní oblastí. Její výhody jsou opět popsány v samostatné kapitole 2.14. V tabulce číslo 9. je zaznamenáno, jakým způsobem je UV záření propouštěno zemskou atmosférou. Z těchto hodnot lze vyvodit, že pokud chceme navrhnout “efektivní” spoj, musí být použit emitor pracující v rozsahu vlnových délek 350 – 400nm. Mezi nevýhody komerčních UV diod patří malá velikost vyzařovacího úhlu, která se pohybuje od 10° po 30°. Samozřejmě se vyrábí i diody vyzařující pod většími úhly, ale ty mají optické výkony na takových úrovních, že by nesplňovali maximální limity hygienických norem. Pokud tedy v návrhu uvažujeme nesměrový spoj, bylo by nutné použít větší množství emitorů a vytvořit takzvané pole diod. Hlavním úskalím takovéto realizace však mohou být rozdíly z výroby mezi jednotlivými diodami. Každá dioda je vyrobena s určitou tolerancí a proto, kdyby bylo realizováno ono pole diod, mohlo by docházet mezi jednotlivými emitery na vysokých komunikačních frekvencích k vzájemným interferencím. Tyto interference by se jistě daly eliminovat po samotné detekci, avšak nejsem si jist do jaké míry. Proto jsem tedy i od spoje v UV oblasti upustil. Díky svým kladným vlastnostem se nejvíce nabízí pásmo infračervené. Ovšem systémy pracující v tomto pásmu jsou natolik komerčně využívány a tím pádem i technologicky vyladěné, že by takovýto navrhnutý komunikační systém nebyl v žádném ohledu přínosem.

Z počátečních nabízených možností zůstala tedy pouze jediná varianta a to návrh optického indoor spoje pracujícího ve viditelném spektru na jedné konkrétní vlnové délce. Představíme-li si rozložení tohoto spektra v závislosti na citlivosti lidského oka, měli bychom se vyvarovat zelené barvě. Důvod tohoto rozhodnutí je patrný z následujícího obrázku.

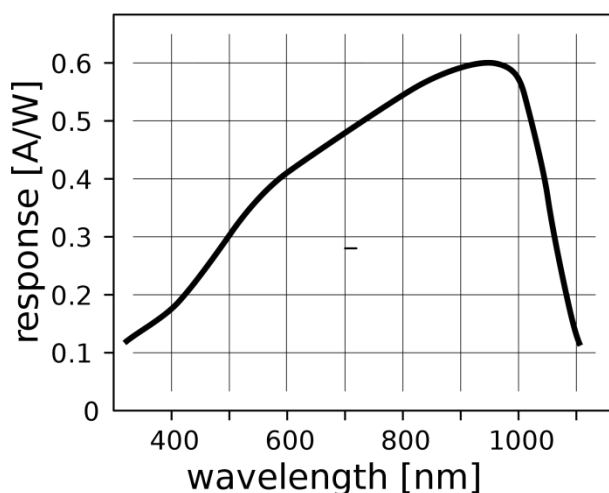


Obr. 3-1 Závislost citlivosti lidského oka na světlo[33]

Nejvyšší citlivosti lidského oka odpovídá vlnová délka 560nm. V úvahu tedy připadají použití LED diody v oblasti červené barvy nebo v oblasti barvy modré. V těchto oblastech je responsivita lidského oka v porovnání s responsivitou na barvu zelenou pouhých 10 % a nebude tedy působit příliš rušivě. Po delší době úvah a konzultací, jsem se rozhodl pro realizaci optického spoje ve viditelném spektru, kde bude jako komunikační prostředek použita LED dioda modré barvy. Je sice pravdou, že modré LED působí rušivěji pro člověka než diody červené, ale tato volba bude v následujícím textu odůvodněna.

3.2 Volba komunikačních diod

Rozhodl jsem se, že mnou navrhovaný systém bude sloužit pro obousměrnou komunikaci a ne pouze jednostrannou, která by byla zřejmě nepraktická. Pokud tedy budu uvažovat nad oboustrannou komunikací, je potřeba vhodně zvolit vysílací diody a stejně tak i přijímací fotodiody. Pokud by navrhovaný systém měl komunikovat oběma směry ve viditelném spektru, bylo by potřeba zamezit vzájemným interferencím vysílaných signálů v místě fotodetekce. Jedním východiskem by bylo použít vysílací diody takové, aby jejich dominantní vlnové délky byly od sebe co možná nejdále, nabízí se tedy kombinace modré a červené barvy. Tím by se daly zajistit i vhodné fotodiody, citlivé pro danou oblast. Takto hovoří teorie, praxe je však jiná. Běžně komerčně dostupná křemíková fotodioda má nejvyšší citlivost v rozmezí vlnových délek 850 – 950nm.



Obr. 3-2 Responsivita křemíkových fotodiod

Dražší typy fotodiod mají díky speciálnímu napařenému filtru toto pásmo různě ořezané. Ovšem i tak je obtížné najít dvě konkrétní fotodiody, které by měly nejvyšší citlivost na modrou barvu v rozmezí vlnových délek 400-450nm a v oblasti barvy červené 650-700nm. Navíc představa toho, že na stropu místnosti svítí modrá dioda a na stole uživatele zase červená, není z pohledu zdravého rozumu moc přípustná. Z hlediska komfortu uživatele, by dioda, sloužící ke komunikaci ve směru od uživatele do sítě, měla být řešena ve spektru, které lidské oko nevnímá. Opět se tedy vracíme k dvěma možnostem a to UV nebo IR pásmo. V tomto projektu jsem se rozhodl řešit komunikaci pomocí diod emitujících záření na vlnové délce 800nm, tedy v pásmu infračerveném.

3.2.1 Komunikace ve viditelném spektru

Pro komunikaci ve viditelném spektru, jsem zvolil LED diodu emitující záření ze spodní části této oblasti. Cílem bylo nalézt takovou diodu, která by měla co nejnížší vlnovou délku a pozorovat jaké přenosové vlastnosti bude mít navrhnutý systém, zdali se zde neprojeví jevy typické spíše pro ultrafialové záření. Druhým požadavkem na diodu byl větší vyzařovaný výkon a to z toho důvodu, aby spoj plnil spolehlivě svou funkci na větší přenosové vzdálenosti, když ke komunikaci bude použita pouze jedna LED. Konečné rozhodnutí padlo na výrobek od firmy Luxeon nesoucí označení LXHL-PR03. Tento jednočipový emitor s dominantní vlnovou délkou 455nm (Royal Blue), vyzařovacím úhlem 140° a příkonem 1W se zdá jako vhodný pro použití v zamýšleném systému. Všechny parametry však budou laboratorně proměřeny a následně porovnány s deklarovanými hodnotami z datasheetu.

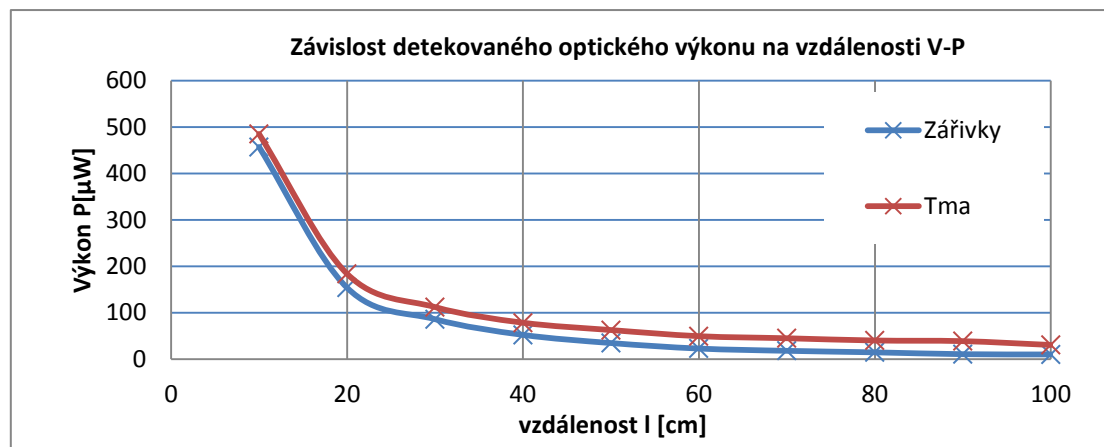


Obr. 3-3 Výkonová dioda LXHL-PR03[18]

Nejprve byl na diodě testován její celkový výstupní výkon a ten je dle výrobce roven hodnotě 220mW. Jelikož je výkon závislý na napětí na diodě a procházejícím proudu, rozhodl jsem se ji otestovat při maximálních hodnotách, při kterých je zaručena správná funkčnost. Tyto hodnoty jsou 4V při procházejícím proudu 350mA. Je samozřejmě jasné, že takto vysokého výstupního výkonu při komunikaci nikdy nedosáhnou a to díky vlastnostem modulačního signálu. Velikost tohoto poklesu je přímo úměrná modulační frekvenci a velikosti střidy signálu. Optický výkon byl měřen přístrojem Vega Ophir s nastavením filtru na 455nm. Proběhla celkem dvě měření při zapnutých zářivkách a při vypnutém osvětlení laboratoře. Při přiložení detektoru bezprostředně k emitující diodě, byl detekovaný výkon roven 247mW, z čehož lze usoudit, že výrobcem udávaná hodnota je správná.

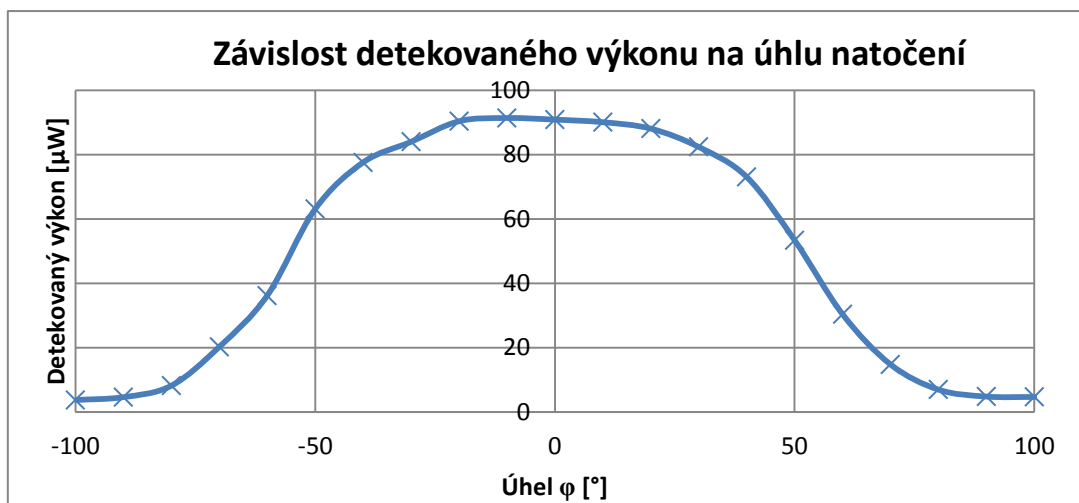
$l[\text{cm}]$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$P_{\text{zářivky}}[\mu\text{W}]$	457	154	86,2	52,4	34,8	22,92	18,03	14,78	10,82	10,25
$P_{\text{tma}}[\mu\text{W}]$	485	184	112,3	78,6	62,8	49,6	45,13	40,29	38,88	30,67

Tab. 3-1 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti



Obr. 3-4 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti

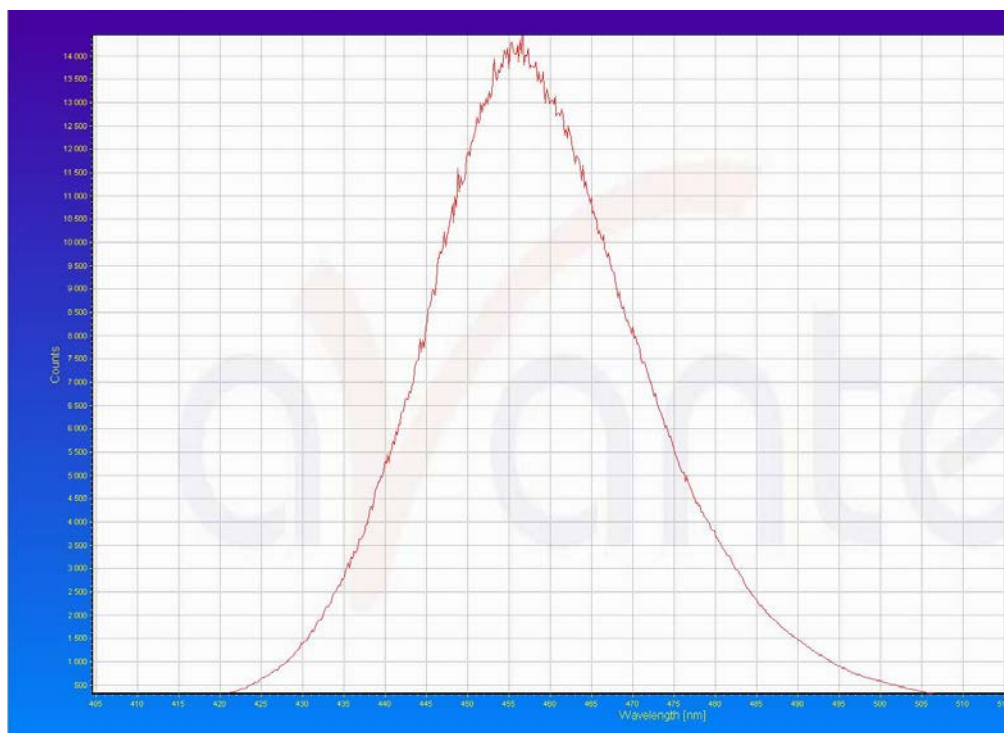
Dalším ověřovaným parametrem byla vyzařovací charakteristika. I zde byl k měření výkonu použit detektor optického výkonu Vega Ophir. Toto měření bylo prováděno v neosvětlené místnosti, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků okolním zářením zářivek.



Obr. 3-5 Závislost detekovaného výkonu na úhlu natočení

Jak je předchozího grafu patrné, udávaný úhel vyzařování 140° je opět přesnou hodnotou. Právě v těchto hodnotách dochází k poklesu výkonu na 20% vůči maximálnímu detekovanému výkonu.

Poslední proměřovaným parametrem diody je dominantní vlnová délka emitující diody. K tomuto měření byl použit optický spektrometr AvaSpec-3648 od firmy Avantes a softwaru AvaSoft Spectrometer 7.0.3.

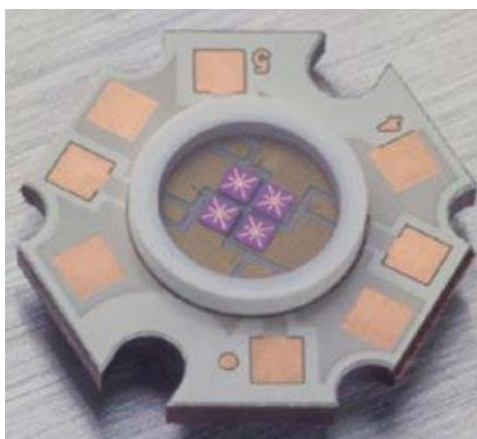


Obr. 3-6 Graf zobrazující dominantní vlnovou délku diody LXHL PR03

Tato měření dokázala, že vybraná dioda díky svým parametrům může dobře posloužit pro navrhovaný spoj. Výstupní výkon je dostatečný, vyzařovací úhel 140° dokáže zajistit pokrytí střední místnosti, dominantní vlnová délka je opravdu 455nm a celá spektrální charakteristika je dostatečně úzká.

3.2.2 Komunikace v infračerveném spektru

Komunikace v IR je zamýšlena ve směru od uživatele k centrální jednotce, aby nepůsobila rušivě na organismus člověka. Výběr diody měl opět několik kritérií. Preferována byla jedna dioda s vyšším výkonem než konstrukce diodového pole sestaveného ze slabších emitorů. Jelikož se jedná o nesměrový spoj, je potřeba, aby vyzařovací úhel byl dostatečný. U běžných infračervených diod se vyzařovací úhel pohybuje v oblasti od $15-30^\circ$. To je ovšem nedostatečné, i přes velmi dobré odrazové vlastnosti záření na této vlnové délce. Volba nakonec padla na čtyřčipovou diodu od firmy Aculed nesoucí označení VHL IR1. Tato výkonová dioda v atypickém hexagonálním pouzdře nese celkem čtyři samostatně řízené čipy. Na každém z těchto emitorů je úbytek napětí roven 1,6V a celkový proud protékající čipem je až 700mA. Dominantní vlnová délka je délka je uváděna 855nm a vyzařovací úhel je 160° . Dioda byla opět podrobena důkladným testům.

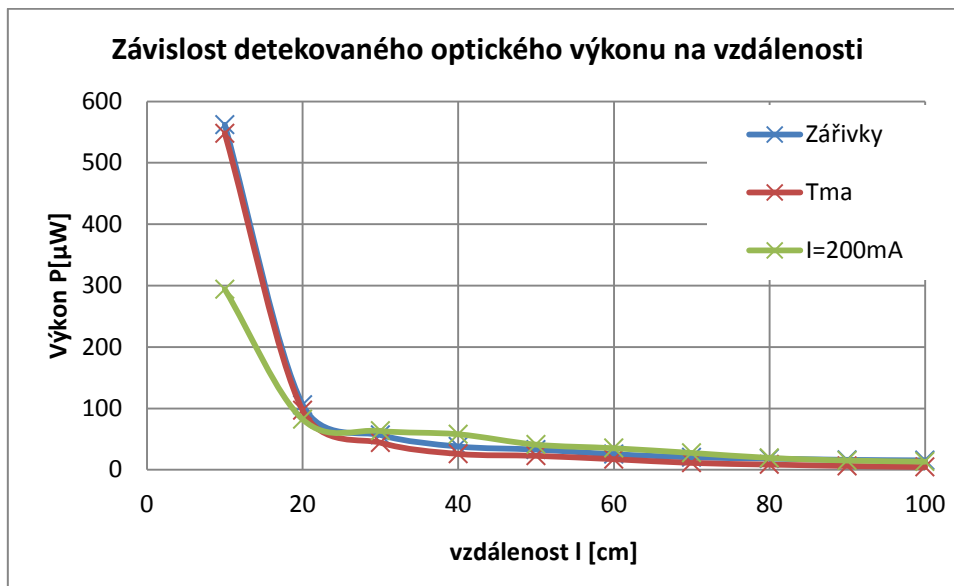


Obr. 3-7 Dioda VHL IR1 [18]

Měření emitovaného výkonu, bylo prováděno pomocí měřiče optického výkonu Vega Ophir, který umožňuje měření na infračervených vlnových délkách s velmi dobrou přesností. Pokus byl opakován dvakrát a to při naprosté tmě v laboratoři a při zapnutých zářivkách. Závislosti byly zaneseny do grafu. V materiálech k této diodě je uváděn maximální výstupní optický výkon na 1 čip přes 500mW při maximální hodnotě proudu 700mA. Tato hodnota se jeví jako velmi vysoká a pro účely tohoto spoje bude pravděpodobně nadbytečná. Dále by pak celkový optický výkon ze čtyř čipů mohl poškodit zrak uživatele. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření na plném výkonu a dále pak na omezeném výkonu. Pro funkci tohoto spoje by měl být dostatečný proud protékající obvodem 200mA. To je však pouze odhad, skutečnost prokáže až měření.

$l[\text{cm}]$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$P_{\text{zářivky}}[\mu\text{W}]$	562	106	56,7	38	33	25,4	20,34	18,31	16,27	15,4
$P_{\text{tma}}[\mu\text{W}]$	548	97	44,2	25,91	22,8	17,3	11,25	8,56	6,32	4,49
$P_{200\text{mA}}[\mu\text{W}]$	294	82,19	63,32	57,9	41,0	35,19	27,5	19,4	15,2	13,28

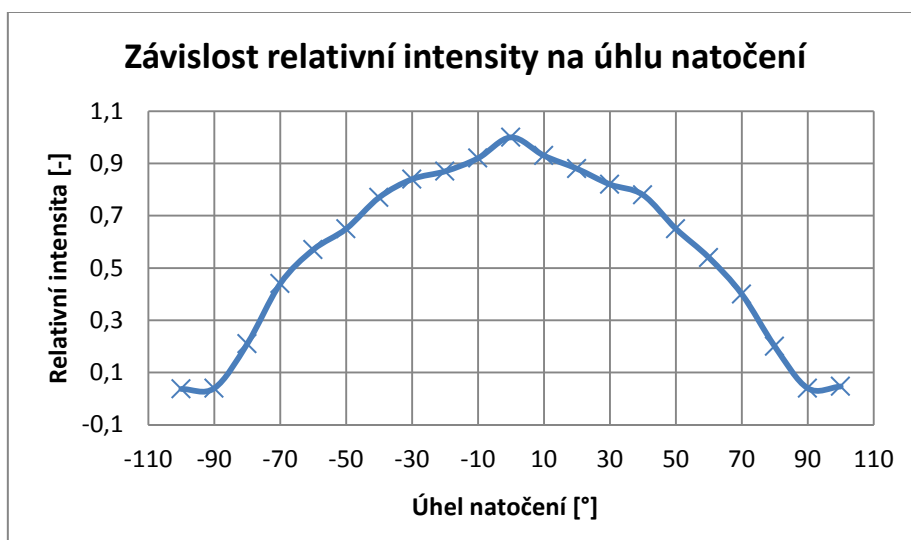
Tab. 3-2 Tabulka závislosti detekovaného výkonu na vzdálenosti



Obr. 3-8 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti u diody VHL IR1

Z naměřených hodnot je vidět, že i při proudu omezeném na 200mA je detekovaný výkon více než dostatečný pro uvažovanou konstrukci spoje.

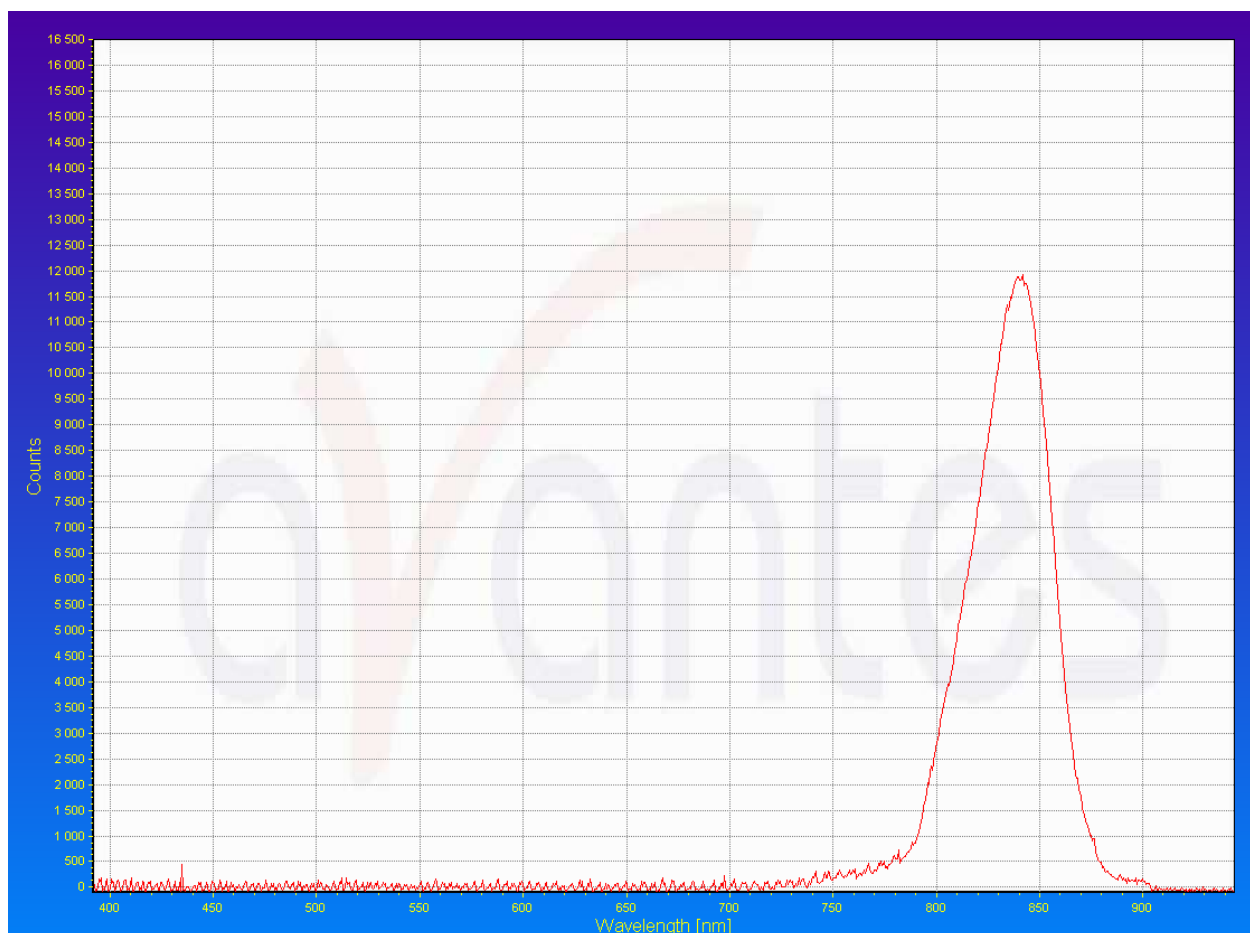
Druhé měření mělo za úkol stanovit vyzařovací charakteristiku a porovnat ji s charakteristikou udávanou výrobcem. V tomto případě se můžeme dočkat zajímavých výsledků a to díky přítomnosti čtyř současně emitujících čipů. K určení charakteristiky byl použit měřák optického výkonu Vega Ophir a měření bylo prováděno za stejných podmínek jako tomu bylo v prvním testu, čili v neosvětlené místnosti.



Obr. 3-9 Závislost relativní intenzity na úhlu natočení VHL IR1

Jak je patrné ze zobrazené vyzařovací charakteristiky, vyzařovací úhel je opravdu udávaných 140° . I samotný průběh odpovídá datasheetovému, až na jednu odchylku. Při mnou prováděném měření jsem narazil na to, že největší intenzitu mělo záření detekované při 0° stupních a po jemné změně úhlu pokleslo na 90% hodnoty. Tento jev připisuji výrobnímu procesu, kde mohlo dojít k naklonění jednoho z emitůrů.

Stejně jako v případě LXHL PR03 bude posledním proměřovaným parametrem infračervené diody VHL IR1 dominantní vlnová délka. Dle specifikací by měla být rovna 855nm a šířka spektrální charakteristiky by neměla přesáhnout 100nm při poklesu na 20% relativní intenzity. K tomuto měření byl použit optický spektrometr AvaSpec-3648 od firmy Avantes a software AvaSoft Spectrometer 7.0.3.



Obr. 3-10 Detekce dominantní vlnové diody VHL IR1

Dle grafu znázorněného na obrázku 3-10, je patrné, že proklamovaná dominantní vlnová délka 855nm nebyla dodržena. Dle opakovaného měření bylo zjištěno, že je od této hodnoty vzdálena o 18nm na hodnotu 837nm. Tento posun by však neměl být nijak dramatický pro bezproblémovou fotodetekci.

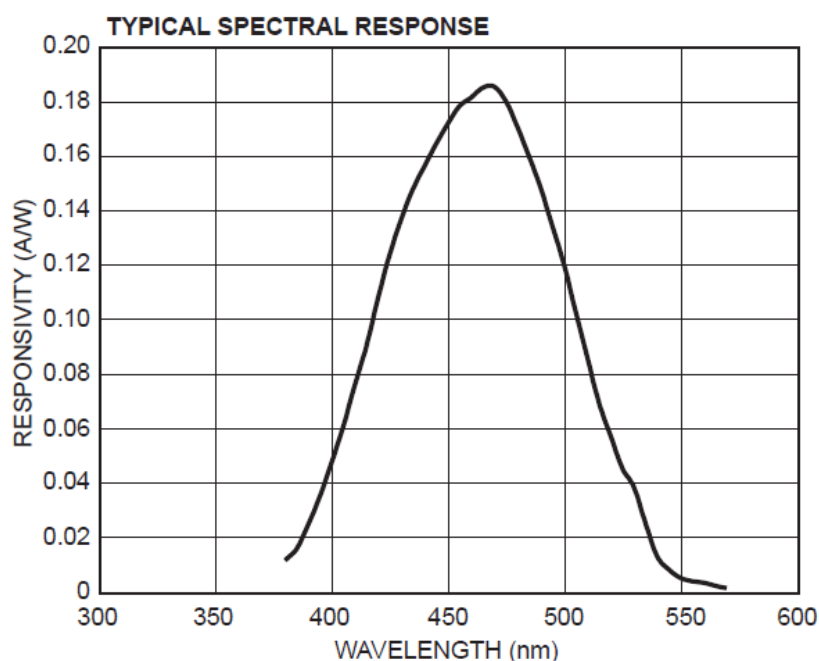
Tímto je kapitola týkající se popisu a měření vybraných diod u konce. Díky změřeným charakteristikám bylo zjištěno, že vybrané diody jsou vhodné pro použití v zamýšleném komunikačním systému. Parametry, jež jsou uváděny v materiálech od výrobců, povětšinou odpovídají změřeným průběhům až na zmiňovanou dominantní vlnovou délku u infračervené LED diody VHL IR1. Následující kapitola bude pokračovat v popisu stěžejních komponent systému a to ve výběru vhodných fotodiod.

3.3 Volba fotodiod

Tato kapitola se věnuje výběru vhodných fotodiod pro navrhovaný systém. Ideální řešením by bylo nalezení takových detekčních prvků, které by dosahovaly nejvyšších citlivostí na dominantních vlnových délkách použitých diod, čili na 455nm a 837nm. S detekcí IR záření by neměl být sebemenší problém, jelikož fotodiody pracující v tomto pásmu mají nejvyšší citlivost v oblasti kolem 800-900nm a oblast viditelného spektra detekují jen velmi slabě. Zato detekce ve viditelném spektru by mohla být složitější, než se z počátku zdálo. Většina komerčně dostupných křemíkových fotodiod dosahuje nejvyšších citlivostí, jak bylo psáno, v oblasti kolem 800nm. Ty však nejsou pro naše účely vhodné, z důvodu nechtěné detekce druhého vysílaného signálu. Nutností tedy je najít fotodiodu citlivou pouze pro viditelné spektrum, nejlépe co nejbližší modré barvě.

3.3.1 Fotodioda pro VLC

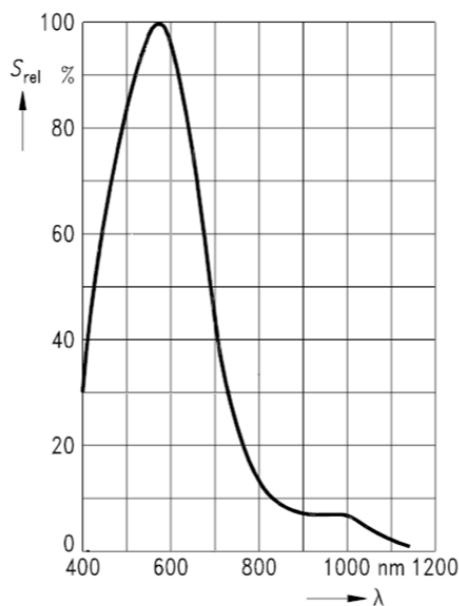
Na trhu se vyskytuje opravdu velké množství výrobců fotodiod, z čehož by se dalo usuzovat, že například pro detekci v modrém spektru bude výběr té nejvhodnější probíhat vzájemným porovnáváním parametrů desítek různých typů. Pravda je však taková, že fotodiod citlivých převážně na vlnění kolem 450nm je opravdu málo. Během usilovného hledání byla nalezena dioda s označením ODD 470W od společnosti ODC. Její spektrální sensitivita je zobrazena v následujícím grafu.



Obr. 3-11 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody ODD 470W

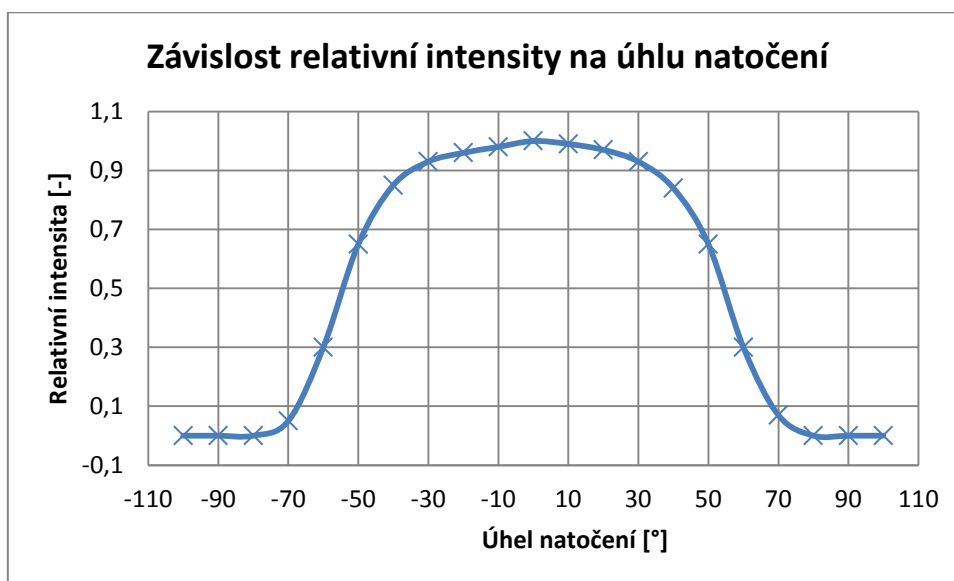
Pro naše účely se jedná o takřka ideální prvek. Nejcitlivější je dioda na 470nm a zároveň detekuje záření jen ve velmi úzkém rozmezí vlnových délek. Největší nevýhodou u takto úzce profilovaných prvků je jejich dostupnost. Pokud není zvažován nákup v řádu stovek až tisíců kusů, stává se tato dioda nesehnatelnou a to jak z pohledu přijatelného časového rozmezí, tak i z pohledu finanční stránky, kde celkové náklady přesahují výši tisíců korun. Nutností tedy je nalezení kompromisního řešení. To bylo nalezeno v diodě označené jako BPW 21.

Tato fotodioda BPW 21 od společnosti Siemens, je komerčně dostupná i v našich zeměpisných šířkách za přijatelnou cenu. Jde o součástku, která je nejcitlivější na vlnění o vlnové délce 560nm, avšak pro uvažované záření na 455nm dosahuje stále účinnosti přesahující 60% maximální hodnoty citlivosti, což se zdá být jako dostatečná hodnota pro navrhovaný spoj. Mezi další výhody patří úzká spektrální charakteristika citlivosti, která nám prakticky zaručuje velmi nízkou šanci detekce IR vlnění z druhé diody systému. Dále je to poměrně velká aktivní plocha diody dosahující $7,34\text{mm}^2$, velmi nízká hodnota temného proudu v řádu jednotek nA a vysoká rychlost náběžné a sestupné hrany při procesu fotodetekce. Následující graf zobrazuje relativní spektrální responsivitu v závislosti na vlnové délce.



Obr. 3-12 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody BPW 21

U fotodiody byl proměřován jen jeden parametr a to závislost relativní citlivosti na úhlu svírající rovina fotodiody s rovinou emitoru. Měření bylo prováděno pomocí vybrané diody LXHL PR03, aby byly výsledky vztaženy k navrhovanému systému.

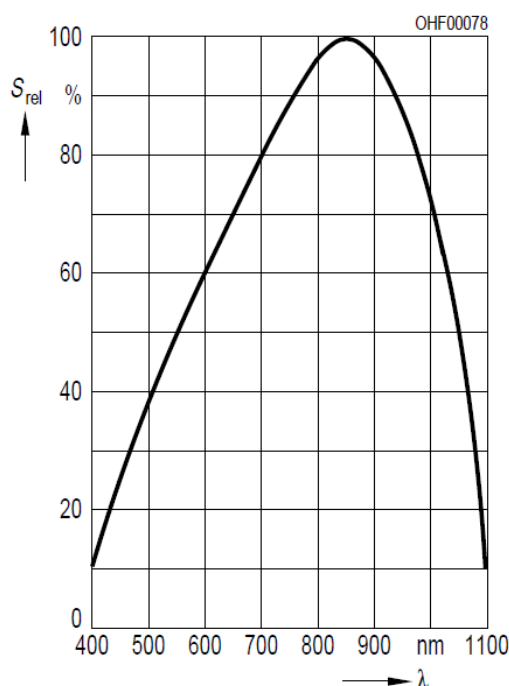


Obr. 3-13 Závislost relativní intenzity na úhlu natočení BPW21

Při porovnání naměřeného průběhu a grafu z datasheetu, je na první pohled viditelné, že oba tyto průběhy se shodují. Poloviční úhel, pod kterým je fotodioda ještě schopna detekovat záření je 60° . Tato hodnota je dostatečná vzhledem ke koncepci zamýšleného optického indoor spoje.

3.3.2 Fotodioda pro IR pásmo

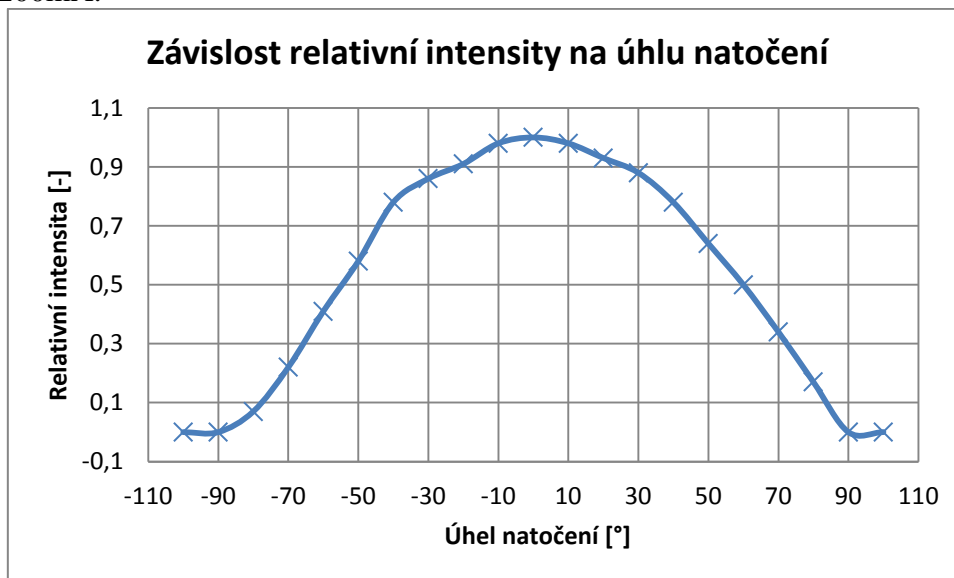
Výběr vhodné diody pro infračervené pásmo byl opět otázkou kompromisního řešení. Ideální fotodioda by měla mít nejvyšší citlivost v oblasti 840-850nm a přitom mít co nejnižší citlivost pro vlnění z oblasti viditelného spektra, zvláště pak na modrou. Dále by měla být schopna detekovat záření pod co největším úhlem. Mezi méně významné faktory jsou řazeny velikost detekční plochy, jelikož vysílací IR dioda VHL R1 má dostatečný výkon pro přenos na velké vzdálenosti. Jelikož řeším všesměrový systém, priorita je stanovena pro všesměrový příjem a proto bude vybírána fotodioda s co nejširší směrovou charakteristikou. Tento faktor je však u IR fotodiód dosti problémem. Typicky je směrová charakteristika v rozsahu $20-40^\circ$, což není vhodné. Z dostupných součástek byla zvolena fotodioda opět od společnosti Siemens s označením SFH 206K. Tato křemíková fotodioda typu PIN je charakterizována následujícími údaji. Nejvyšší citlivost má detektor pro vlnění na 850nm, důležitým faktorem je pouze 20% citlivost na záření na 450nm oproti záření na 850nm, což by mělo být dostatečné pro eliminaci vzájemných interferencí emitujících diód. Následující graf zobrazuje závislost této citlivosti na vlnové délce.



Obr. 3-14 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody SFH 206K

Mezi další vlastnosti patří 120° stupňová směrová charakteristika, hodnota temného proudu pouze 2nA, vysoká detekční rychlost 20ns, detekční plocha 7mm^2 a spektrální citlivost 0,62A/W.

Jako i předchozí fotodiody BPW 21 tak i tato IR SFH 206F bude podrobena testování na ověření směrové charakteristiky. Jakožto zdroj infračerveného záření byla použita LED dioda VHL IR1, která je zamýšlena jako komunikační dioda navrhovaného spoje. Pro objektivitu měření, byly na vysílací diodě nastaveny takové podmínky, které budou použity i v reálných zařízeních, což znamená, že výkon bude omezen snížením protékajícího proudu z 700mA na hodnotu 200mA.



Obr. 3-15 Závislost relativní intensity na úhlu natočení

Ze směrové charakteristiky lze pozorovat, že u této diody není symetrická. Zřejmě zde došlo k chybě během výrobního procesu a detektor je z jedné strany omezen. Tato limitace však není nikterak dramatická a neměla by se projevit na bezproblémovém chodu optického indoor spoje.



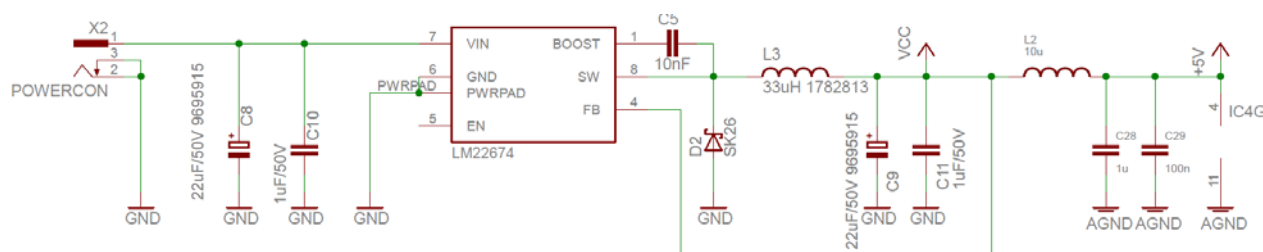
Obr. 3-16 Nalevo fotodiody BPW 21, napravo fotodiody SFH 206K

Tímto končí velká kapitola, ve které byly popsány kritéria výběru fotodiody a zvolené komponenty pak byly podrobeny laboratornímu proměření k ověření hodnot udávaných výrobcem v datasheetech. V případě výběru obou fotodiody šlo o kompromisní volbu mezi nabízenými součástkami. Byl stanoven žebříček priorit, dle kterých byl výběr prováděn. Výsledkem je pak zvolení fotodiody od společnosti Siemens označovaná jako BPW 21 pro detekci záření v oblasti viditelného spektra a diody rovněž od Siemensu SFH 206K pro detekci záření infračerveného. V následující kapitole můžeme přistoupit již k samotné realizaci jednotek pro optický indoor spoj.

4 Obvodové řešení spoje

4.1 Návrh stabilizátoru

Jelikož oba moduly, jak přijímací tak i vysílací, budou potřebovat stabilní napájení, bylo logickým krokem umístit na desku plošných spojů společně s komponenty pro optickou komunikaci také prvky zajišťující stabilizaci napětí. Jako nejvhodnější typem pro tuto konstrukci se jevil spínaný stabilizátor, což v praxi znamená zapojení klasického DC/DC step down měniče. Tyto obvody slouží k regulaci elektrické energie, kdy mění vstupní napětí U_1 na jiné stejnosměrné napětí U_2 . Označení „Step down“ znamená zase snižující. Z mnoha nabízených typů byl vybrán měnič od National Semiconductor nesoucí označení LM22674 konkrétně ve verzi 5.0. Tento obvod má poměrně široký rozsah vstupního napětí od 6,5V do 40V s tím, že na výstupu je garantována hodnota 5V s maximální odchylkou $\pm 3\%$ tzn. (4,850-5,125V). Tento měnič je schopen do zátěže dodávat až 500mA, což by mělo pro centrální jednotku opatřenou LED diodou LXHL PR03 stačit, jelikož maximální proud do diody může být 350 mA. Na ostatních komponentech bude proudové zatížení minimální. Pro druhou jednotku, kde se ke komunikaci bude používat infračervená LED dioda VHL IR1 je však tento stabilizátor nedostatečný. Dodávaných 500mA by nestačilo pro plánované napájení 200mA na jeden čip. Proto do této jednotky bude zabudován stabilizátor LM22675, jež má naprosto totožné parametry jako dříve popisovaný LM22674 až na to, že je schopen do obvodu dodávat proud o velikosti až 1A. Zapojení bylo provedeno dle doporučení uvedených v dokumentaci tohoto stabilizátoru až na několik drobných změn. Následující obrázek popisuje schéma spínaného stabilizátoru.



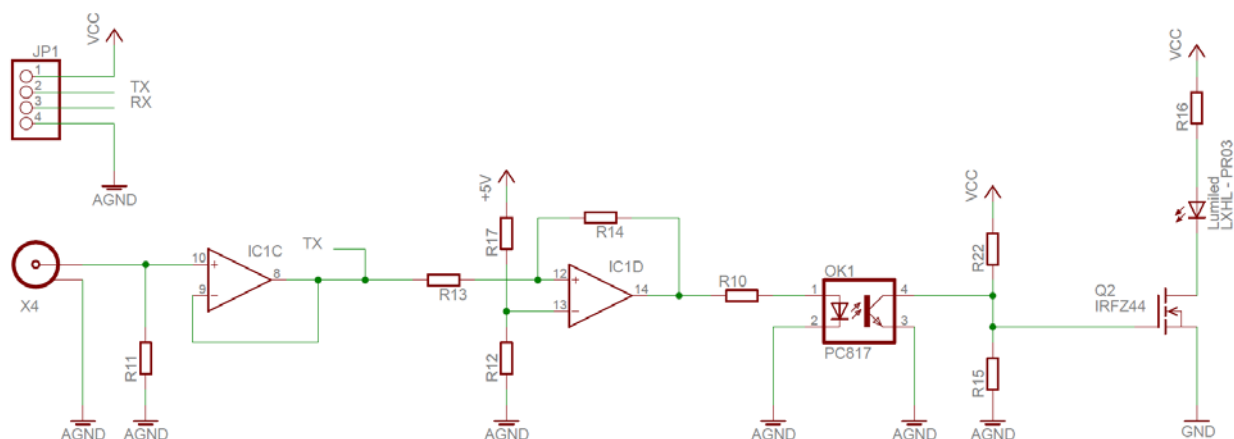
Obr. 4-1 Schéma stabilizátoru

Takto navrhnutý stabilizátor byl nejprve otestován na kontaktním poli. Předmětem měření byla výstupní úroveň napětí a jeho stabilita při prudkých změnách napájecího napětí. Výstupní úroveň byla měřena při krokové změně napájení od 6,5V až po 30V a výsledkem byla stále stejná hodnota výstupního napětí 4,985V. Stejně tak tomu bylo i při testování prudkých změn napájení, kde si stabilizátor svoje výstupní napětí dokázal uchovat. Při sepnutí LED diody došlo ke změně hodnoty stabilizovaného napětí na 4,73V což je změna o 5%.

4.2 Návrh vysílačů

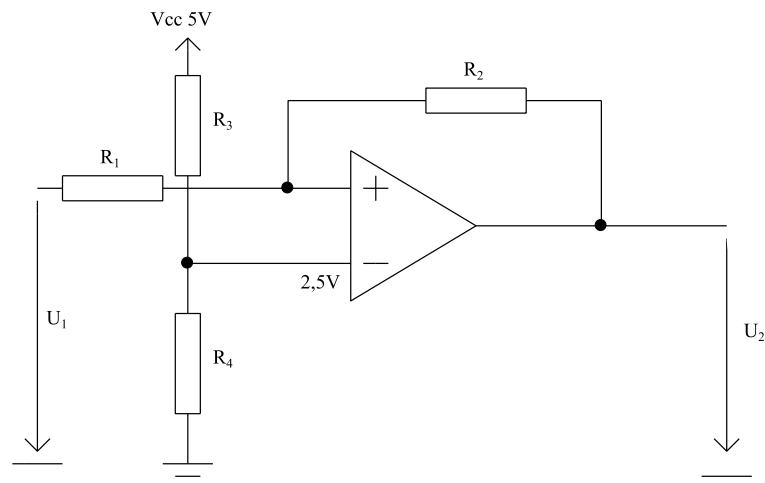
V této kapitole se práce dostává do své nejpodstatnější části a to do samotného návrhu zapojení vysílačů a přijímačů pro navrhovaný optický spoj. Nejprve zde bude zobrazeno celkové schéma vysílače a poté budou jeho komponenty popsány.

4.2.1 Centrální (Stropní) jednotka - vysílač



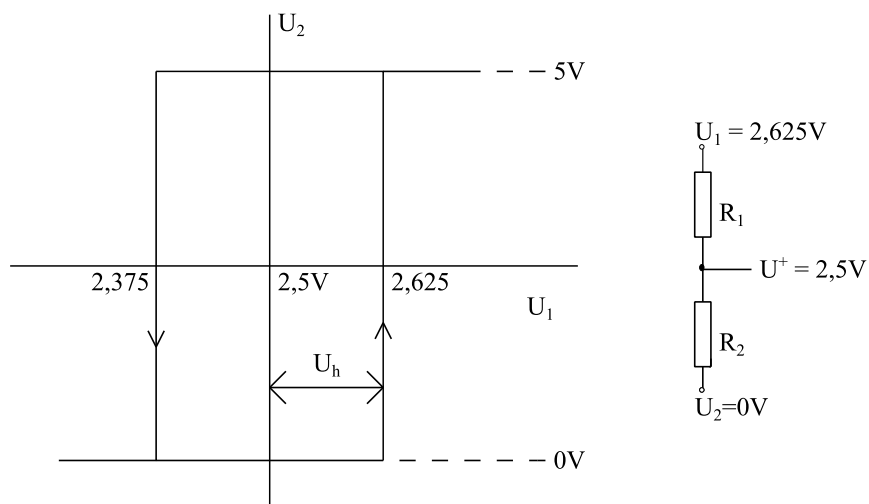
Obr. 4-2 Schéma centrální jednotky - vysílač

Pro potřeby laboratorního měření jsou všechny vstupy a výstupy zakončeny klasickými BNC konektory. V tomto konkrétním případě je označován zkratkou X4. Odpor R11 má hodnotu 470Ω a je součástí doporučeného zapojení impedančního převodníku reprezentovaného operačním zesilovačem IC1C. Operační zesilovače byly vybrány od společnosti Analog Devices a nesou označení AD8664 [21]. Jejich výhodou je zařazení do skupiny nízkošumových OZ s tzv. rail-to-rail výstupem. To znamená, že na výstupu operačního zesilovače mohou dostat takřka hodnotu napájecího napětí (teorie hovoří o napájecí hodnotě přímo, ale měřením jsem ověřil, že dojde k malému úbytku). Dále pak šířka pásma OZ je 4MHz, což potřebám tohoto návrhu plně dostačuje a zároveň se při testování obvod nedostal do resonance. Mezi jeho výstupem a odporem R13 je vyveden výstupní signál z impedančního převodníku na externí bod lámací lišty. Ten zde byl navrhnout jakožto pomocný měřicí bod správné funkčnosti převodníku. Odpory R13 a R14 zde byly zařazeny k umělému vložení hystereze z toho důvodu, aby při přechodech mezi stavy nedocházelo k nechtěným záskokům při komparaci v operačním zesilovači IC1D, který je zde zapojen jako neinvertující komparátor s hysterezí. V následujícím nákresu je popsán výpočet hodnoty hysterezních rezistorů. Jako dostatečná hodnota pro hysterezní napětí byla zvolena hodnota $U_h=0,125\text{ V}$.



Obr. 4-3 Schéma komparátoru s hysterezí

V tomto schématu jsou počítané odpory pro nastavení hystereze označovány jako R1 a R2, odpory R3 a R4 slouží jako napěťový dělič, aby na druhém vstupu komparátoru bylo napětí 2,5V. Problematika hystereze je nejvíce patrná při zobrazení hysterezní křivky.



Obr. 4-4 Hysterezní křivka

$$U^+ = (U_1 - U_2) \cdot \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (1)$$

$$\frac{U^+}{(U_1 - U_2)} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

$$\frac{U^+}{(U_1 - U_2)} \cdot R_1 = R_2 - \frac{U^+}{(U_1 - U_2)} \cdot R_2$$

$$R_1 = \frac{\left(1 - \frac{U^+}{(U_1 - U_2)}\right) \cdot R_2}{\frac{U^+}{(U_1 - U_2)}}$$

Hodnotu odporu R2 zvolíme jako 24kΩ

$$R_1 = \frac{\left(1 - \frac{2,5}{2,625}\right) \cdot 24000}{\frac{2,5}{2,625}}$$

$$\mathbf{R_1 = 1200\Omega}$$

Výsledkem výpočtů tedy je, že pro hysterezi o velikosti 0,125V musíme osadit rezistory o nominálních hodnotách R13=1200Ω a R14=24kΩ. Odporový dělič složený z rezistorů R17 a R12 má za úkol přivést na druhý vstup komparátoru napětí 2,5V. Hodnoty těchto rezistorů byly zvoleny R17=R12=4700Ω. Signál po komparaci v OZ IC1D prochází přes odpor R10 o velikosti 360Ω, který zde má za úkol nastavit proud tekoucí do následujícího bloku a to optočlenu. Tento optočlen nese označení BPC-817C [23] a je od společnosti Bright LED Electronics. Jde o jednobáňový optočlen s vysokou izolační pevností, který v obvodu plní funkci galvanického oddělení. Zapojení napájení tohoto optočlenu přes odpory R15 a R22 s hodnotami 300Ω a 110kΩ zaručuje, že dioda bude v době nepřítomnosti modulačního signálu svítit. Dle mého názoru to bude pro uživatele méně rušivé neustálé svícení jedné diody, než časté problikávání v době aktivity přenosu. Lidské oko se přeci jen po určité době adaptuje na okolní záření a přestane jej vnímat rušivě. Výsledný modulační signál z optočlenu poté vstupuje na Gate unipolárního MOSFET tranzistoru. Pro potřeby návrhu optického vysílače, byla prioritou vybrat dostatečně rychlý a přitom i úsporný tranzistor. Vybrán byl N-kanálový MOSFET označovaný IRFZ44 [20] a pochází od výrobce Vishay. Tento transistor byl vyroben jako velmi rychlý spínač, což přesně zapadá do koncepce tohoto návrhu. V oblasti zapojení je vývod Source uzemněn a na Drainu je zapojena dioda v závěrném směru. Dioda v tomto schématu je vybraná a otestovaná LXHL PR03. Posledním krokem je dopočítat velikost odporu R16 tak, aby na něm byl takový úbytek napětí, že se na LED diodě objevilo námi požadovaných 3,5V.

$$U_R = U_C - U_D \quad (2)$$

$$U_R = 5 - 3,5$$

$$\mathbf{U_R = 1,5 V}$$

Při úbytku 3,5V na diodě jí bude protékat proud 350mA. U Ohmova zákona tedy vypočteme hodnotu odporu R16.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

$$R = \frac{1,5}{0,350}$$

$$\mathbf{R = 4,29\Omega}$$

Z řady volíme odpor R16=4,7Ω.

Důležité také je, že na tomto odporu R16 bude vznikat v době, kdy nebude přítomen modulační signál a dioda bude emitovat plným výkonem, dosti velký ztrátový výkon.

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

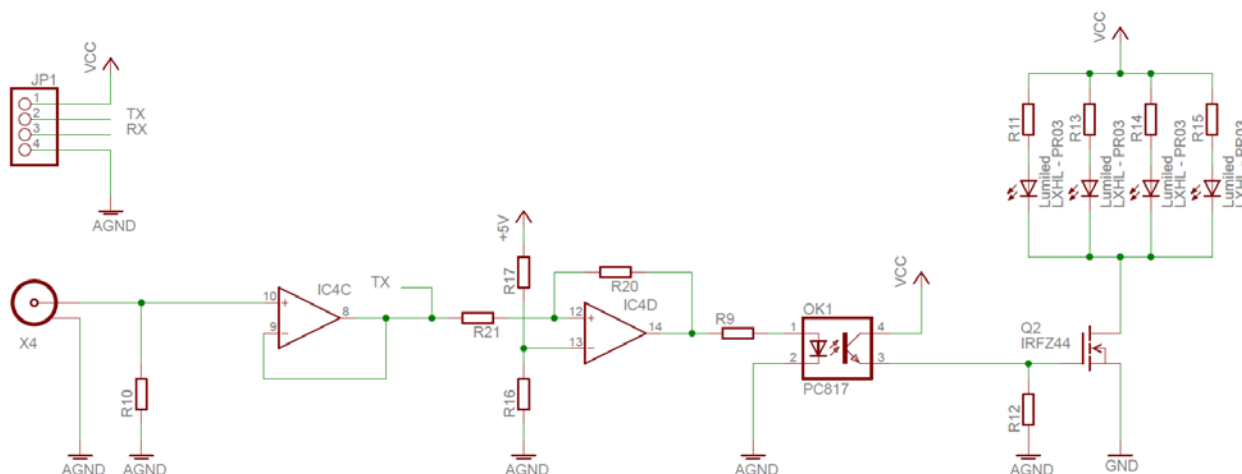
$$P = 1,5 \cdot 0,350$$

$$P = 0,525 \text{ W}$$

Takovýto výkon překračuje téměř dvojnásobně povolenou maximální hodnotu pro SMD rezistory a je proto nutné použít typ, který je schopen tento ztrátový výkon odvést. Tím je návrh vysílací části centrální jednotky kompletní. Jeho funkčnost však prokáže až reálné testování avšak simulace v programu PSpice AD proběhly v pořádku.

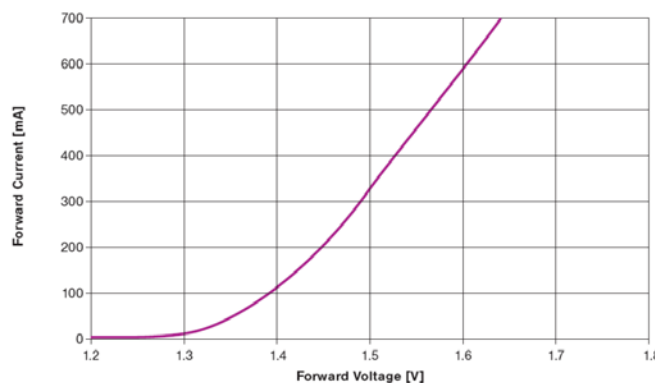
4.2.2 Mobilní (Uživatelská) jednotka - vysílač

Schéma vysílače, v němž je použita ke komunikaci infračervená dioda VHL IR1, je svým obvodovým řešením podobné předchozímu návrhu až na několik drobných úprav, které jsou nutné z důvodu změny principu funkce emitující diody.



Obr. 4-5 Schéma mobilní jednotky - vysílač

Jak je patrné ze zobrazeného obrázku, schéma je totožné až na 2 věci. První z nich je zapojení optočlenu. Ten je tentokrát zapojen tak, aby infračervená dioda VHL IR1 emitovala záření pouze v okamžiku, kdy je na ní přítomen modulující signál. Tento krok byl podniknut z důvodu energetické úspory a uživatelského komfortu. Hodnota odporu R12 mezi optočlenem a tranzistorem je 220Ω. Druhou změnou na schématu je logicky část s diodou. Jak již bylo v práci několikrát zmíněno LED VHL IR1 je prvek nesoucí v jednom pouzdře čtyři samostatně řízení čipy. Je tedy nutné spočítat jak velké sériové odpory je nutno osadit, aby na diodě byl potřebný úbytek napětí, při kterém prochází diodou proud 200mA. Dle průběhu uvedeného v datasheetu[19] protéká diodou proud 200mA při napětí 1,45V.



Obr. 4-6 Voltampérová charakteristika diody VHL IR1 [19]

Vůči napájecímu napětí 5V vzniká tedy úbytek na odporu 3,55V. Z Ohmova zákona tedy vypočteme velikost odporu $R_{11}=R_{13}=R_{14}=R_{15}$.

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{3,55}{0,200}$$

$$R = 17,75\Omega$$

Z řady tedy volíme odpor o velikosti 18Ω.

Stejně jako v předchozím případě je nutné spočítat ztrátový výkon a podle něj volit vhodný typ rezistoru.

$$P = U \cdot I$$

$$P = 3,55 \cdot 0,20$$

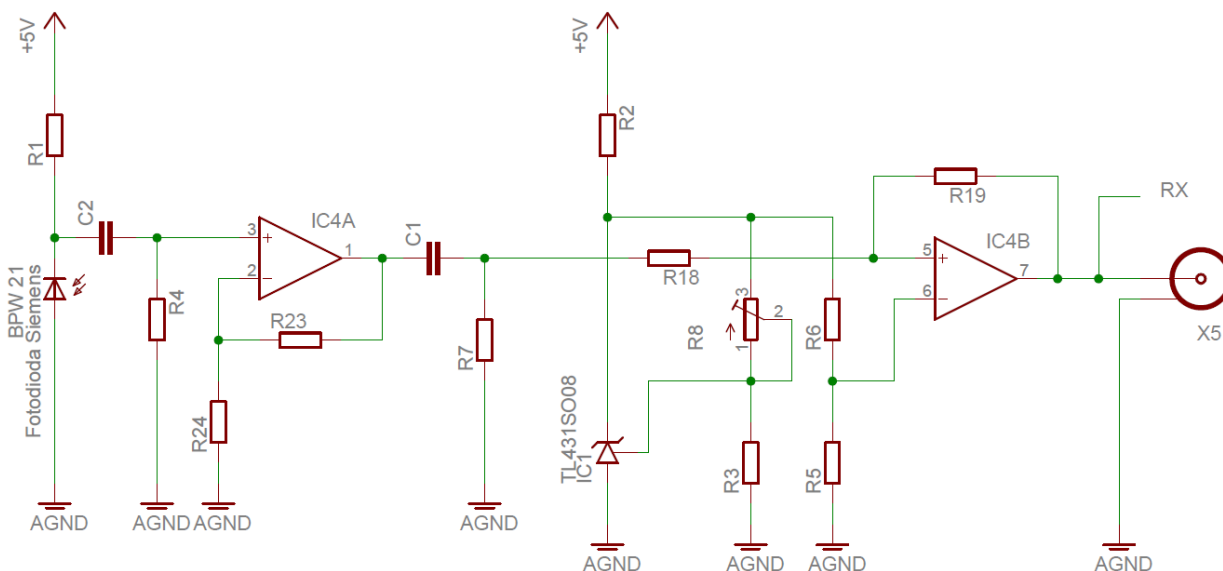
$$P = 0,71 W$$

I v tomto případě je tedy použití SMD rezistorů nevhodné díky jejich maximální hodnotě ztrátového výkonu. Je nutné použít klasický metalizovaný do 1W rezistor nebo ztrátové teplo rozložit na více dílčích SMD rezistorů, jejichž výsledná hodnota by byla 18 Ω.

Tímto je u konce kapitola zabývající se návrhem schémat pro oba zamýšlené vysílače. Byly zde popsány schémata jak z hlediska funkce, tak i z pohledu výběru reálných komponent. Dále zde byla řešena problematika hysterezní komparace s výpočtem hodnot odporů pro konkrétní situaci a nastíněn byl i výpočet hodnoty sériových odporů u vysílacích diod a předpokládaných ztrátových výkonů. Následující kapitola se bude věnovat návrhu obou přijímačů.

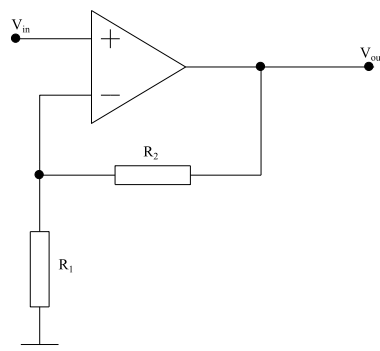
4.3 Návrh přijímačů

4.3.1 Mobilní (Uživatelská) jednotka - přijímač



Obr. 4-7 Schéma mobilní jednotky - přijímač

Prvním popisovaným obvodem je přijímač z mobilní jednotky, kterou bude mít umístěnu u sebe uživatel. Pro fotodetekci je použita fotodioda BPW 21, která je zapojena v závěrném směru. Velikost odporu R1 musela být stanovena experimentální metodou. Měřením byla zjištěna největší citlivost fotodiody při hodnotě rezistoru $R1 = 39k$, pro velké hodnoty R1 byla fotodioda příliš citlivá na světlo pozadí (denní světlo, světlo zářivek) a užitečný signál byl malý. Naopak pro malé hodnoty R1 byl potřeba velký světelný výkon vysílače a dosažená vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem byla velmi malá. Detekovaný signál je dále přes keramický kondenzátor C2 s kapacitou $1\mu F$. Ten zde slouží jakožto filtr stejnosměrné složky signálu. Odpor R 4 má hodnotu $910k\Omega$. Následně je signál přiveden na vstup neinvertujícího zesilovače. Jelikož je detekovaný signál velmi slabý, bude nutné zvolit dostatečně velké zesílení. Volba velikosti zesílení se nastaví stanovením správného poměru mezi odpory R23 a R24.



Obr. 4-8 Neinvertující operační zesilovač

Na předchozím obrázku ne znázorněno zapojení neinvertujícího operačního zesilovače. Výstupní zesílení je dáno následujícím vztahem.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5)$$

Jak již bylo napsáno, detekovaný signál je velmi slabý v řádu mikrovoltů, proto jej bude nutné dosti zesílit. Rezistory jsou tedy zvoleny následovně $R_2=2k\Omega$ a $R_1=12\Omega$.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{2000}{12}\right)$$

$$U_{out} = 168 \cdot U_{in}$$

Takto navržený neinvertující zesilovač bude mít výsledné zesílení rovné 168. Díky tomu, že i v přijímačích jsou použity OZ AD8664, které jsou typu rail-to-rail, můžeme na výstupu očekávat napětí až 5V. Takto zesílený signál je poté veden skrze analogový filtr. Jde o zapojení CR kde je odpor R_7 veden na zem, tedy o filtr typu horní propust a jeho mezní kmitočet je nastaven na 1 kHz. Ze vzorce jsme schopni spočítat hodnoty odporu a kondenzátoru při známé mezní frekvenci.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (6)$$

$$1000 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Zvolíme velikost kondenzátoru na 22nF.

$$1000 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 22 \cdot 10^{-9}}$$

$$R = 7234\Omega$$

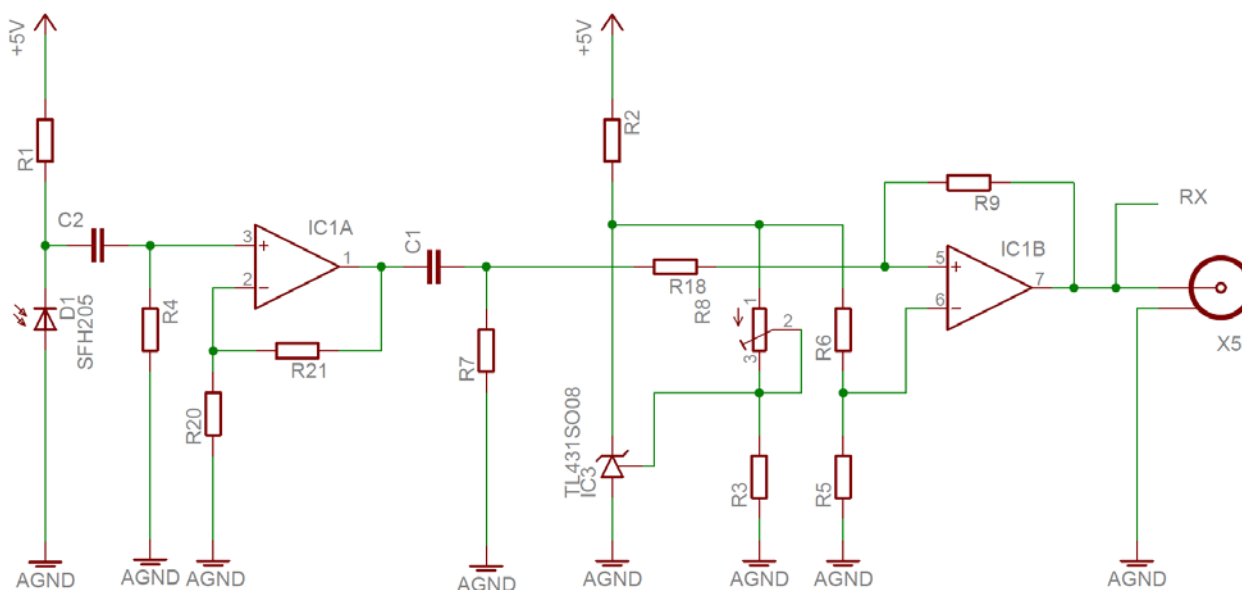
Z řady je této hodnotě nejbližší rezistor o nominální hodnotě 7500 Ω . Signál je poté přiveden na vstup operačního zesilovače, který je v zapojení neinvertujícího komparátoru s hysterezí. Zavedená hystereze je pomocí rezistorů R_{18} a R_{19} a má stejnou hodnotu jako ve dříve řešených vysílačích $U_h=0,125V$, tudíž i odpory budou mít stejnou hodnotu. $R_{18} = 1200\Omega$ a $R_{19} 24000\Omega$. Důležitou částí v tomto zapojení je zdroj komparačního napětí přivedeného na druhý vstup OZ pro nastavení rozhodovací úrovně. Zdrojem tohoto napětí je řízená zenerova dioda označovaná TL431[22] od společnosti Texas Instruments. Je napájena stabilizovanými 5V přes odpor R_2 s hodnotou 430 Ω . Dioda je zapojena ve formě napěťového děliče, jejíž výstupní napětí lze nastavit napětím na referenčním pinu. Takové napětí získáme dělicím poměrem následujícího děliče, který se skládá z rezistoru $R_3 = 820\Omega$ a proměnného rezistoru R_8 (0-1k Ω). Proměnný rezistor je zapojen ve formě reostatu, kdy je měněna pouze jedna část druhého děliče a tím jeho dělicí poměr. Změnou poměru samozřejmě měníme i jeho výstupní napětí, které je připojeno na referenční pin diody. Následnou změnou referenčního napětí měníme i úbytek napětí na zenerové diodě, což způsobí změnu výstupního napětí prvního děliče. Úbytek napětí na řízené zenerové diodě lze nastavovat v rozsahu od 2,51V do 16V. Zařízení využívá pouze rozsahu od 2,51V do 5V napájecího napětí. Možnost nastavitelné

reference byla zvolena z důvodu nutnosti změny rozhodující úrovně komparátoru. Úroveň je nutné nastavit v závislosti na parazitním osvětlení fotodiody.

Řízená zenerova dioda je zde použita díky své vysoké přesnosti a stabilitě. Úbytek napětí, který vzniká na diodě, je konstantní i při mírném kmitání napájecího napětí, což bylo otestováno, avšak v plánovaném zapojení bude dioda napájena napětím ze stabilizátoru, takže by k žádným napěťovým výkyvům dojít nemělo. Kdybychom využili jen čistě odporového děliče, tak by se při zvlnění napájecího napětí měnil i jeho dělicí poměr a tím i reference samotného komparátoru. Kmitající reference by vedla ke špatnému vyhodnocování přenášených logických úrovní. Takovýto problém by zkresloval přijatá data a v neposlední řadě zapříčiňoval výpadky přenosového kanálu. Výstupu neinvertujícího komparátoru je přímo propojen s BNC konektorem pro snadné měření na školních osciloskopech. Stejný signál je vyveden také na pin lámací lišty a nese označení R_x . To je k popisu přijímače určeného pro mobilní jednotku vše. Stejně tak jako v předchozí kapitole o vysílačích, byl i zde důkladně popsán princip návrhu přijímacího obvodu s výběrem vhodných komponent pro správnou funkci.

4.3.2 Centrální (Stropní) jednotka - přijímač

Schéma stropní jednotky využívající ke komunikaci infračervenou diodu VHL IR1, je totožné jako v případě mobilní jednotky. Jen hodnoty některých součástek jsou zvoleny jinak.



Obr. 0-1 Schéma centrální jednotky - přijímač

Jelikož je zde použita jiná fotodiody, konkrétně SFH206, musí i sériový odpor R1 mít jinou hodnotu. Během testování bylo zjištěno, že nejvhodnější hodnotou je 100k Ω . Při nižších hodnotách R1 byl limitován dosah spoje o desítky procent a při vyšších byla zase fotodiody příliš ovlivňována okolním zářením. Další změnou je nastavené zesílení operačního zesilovače IC1A. Jelikož je vysílací dioda výkonnější než zdroj modrého záření, není zapotřebí vzhledem k vyšším úrovním přijatého signálu použít tak velké zesílení, jako v případě VLC. Zesílení proto bude nastaveno na poloviční hodnotu pomocí následujícího vzorce.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Pokud bude ponechána hodnota odporu R_1 na 12Ω a zesílení je požadováno kolem hodnoty 80, bude nejjednodušší použít jako hodnotu pro $R_2 = 1k\Omega$.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{1000}{12}\right)$$

$$U_{out} = 84 \cdot U_{in}$$

Výsledné hodnoty odporů u zesilovače tedy jsou $R_{20} = 12\Omega$ a $R_{21} = 1k\Omega$. Poslední změnou vůči předcházejícímu schématu je jiná hodnota proměnného odporu R_8 a pevného rezistoru R_3 . Proměnný rezistor R_8 může nabývat hodnot od $0-470\Omega$ a odpor R_3 má pevně danou hodnotu 470Ω .

Tímto končí kapitola týkající se návrhu komunikačních modulů. Byly zde navrženy schémata vysílačů, přijímačů a stabilizátorů osazené reálnými a proměřenými součástkami. Byly spočítány hodnoty odporů pro nastavení děličů, hysterezních napětí i zesilovacích poměrů. V závěrečné kapitole této diplomové práce bude tento systém realizován a důkladně proměřen.

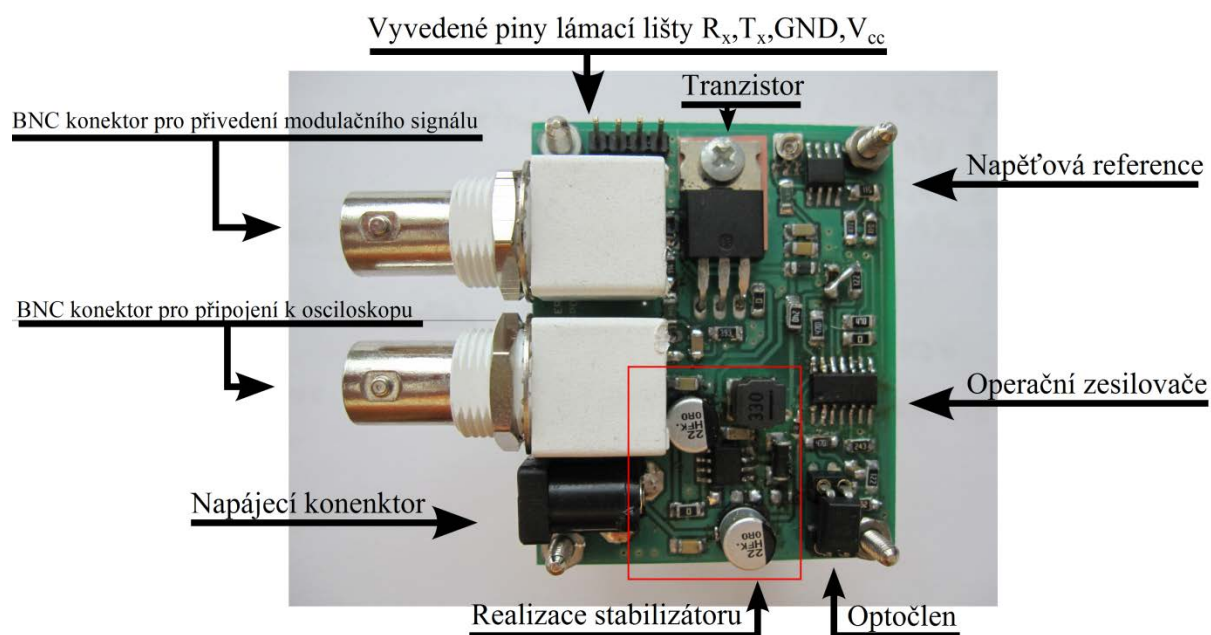
5 Realizace komunikačních jednotek

5.1 Úvod

Tato kapitola se bude týkat realizace desky plošných spojů, osazení všemi komponenty a následnému testování obou vyrobených jednotek. Vše bude doprovázeno názornými fotografiemi popisující rozložení komponent a také obrázky popisující principy měření.

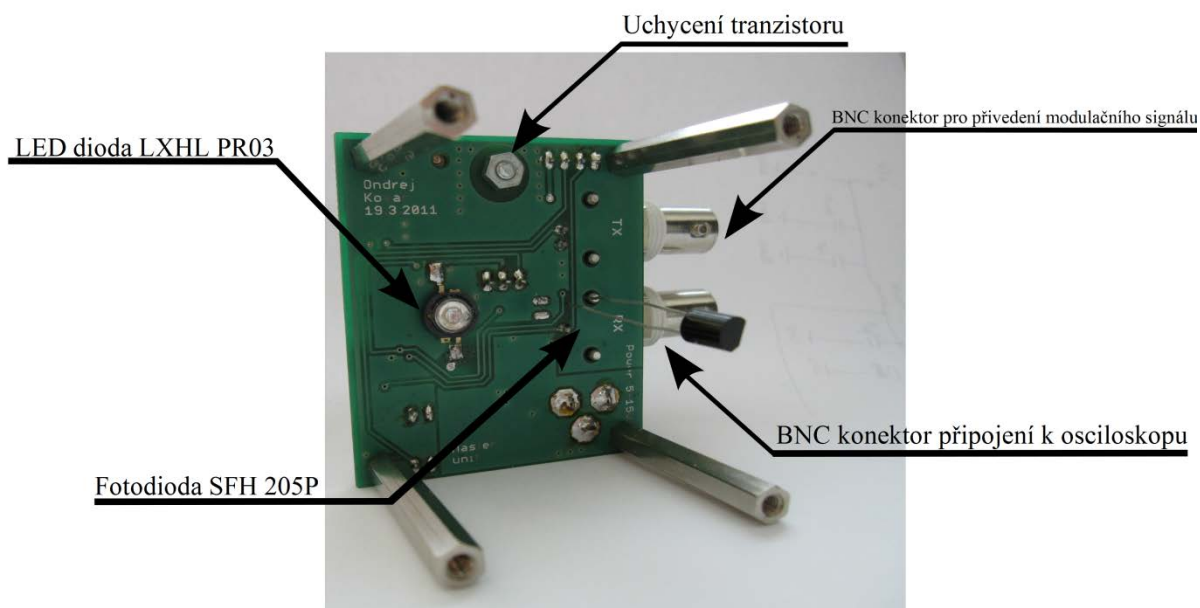
5.2 Centrální (Stropní) jednotka

Cílem bylo navrhnout obě jednotky tak, aby byly moduly co možná nejmenší, ale zároveň s ohledem na to, aby byla plocha plošného spoje dosti velká na to, aby dokázala rozvést ztrátový výkon osazených komponent. Nakonec byla velikost této desky navržena na 5,5x4,5 cm. Následující obrázek zobrazuje osazenou desku centrální jednotky při pohledu ze shora.



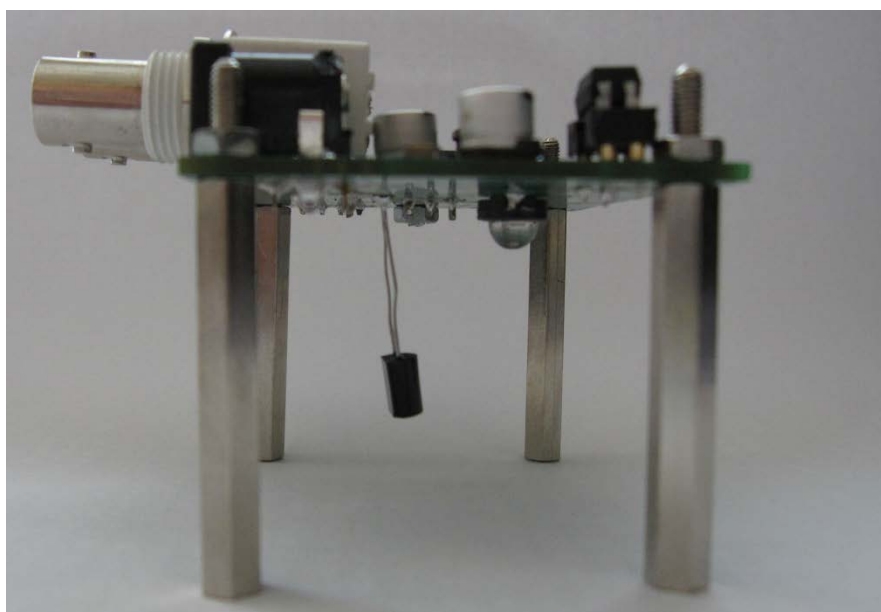
Obr. 5-1 Centrální jednotka – vrchní část

Na obrázku lze pozorovat, že všechny komponenty, které jsou součástí stabilizátoru, byly rozmístěny v levém dolním okraji desky plošného spoje. Je to z toho důvodu, aby nedocházelo k vzájemným interferencím mezi vodiči stabilizátoru a vodiči datovými. Jak je z fotografie patrné, není zde osazena jak LED dioda tak ani fotodioda. Oba tyto komponenty byly umístěny na spodní stranu desky. Důvodem takového kroku byla praktičnost a také skutečnost, že dioda LXHL PR03 má ve svém pouzdře dosti velkou plochu a také se zahřívá, což jsou argumenty jasně hovořící pro použití spodní strany desky. Následující obrázek popisuje spodní stranu desky.



Obr. 5-2 Centrální jednotka - spodní část

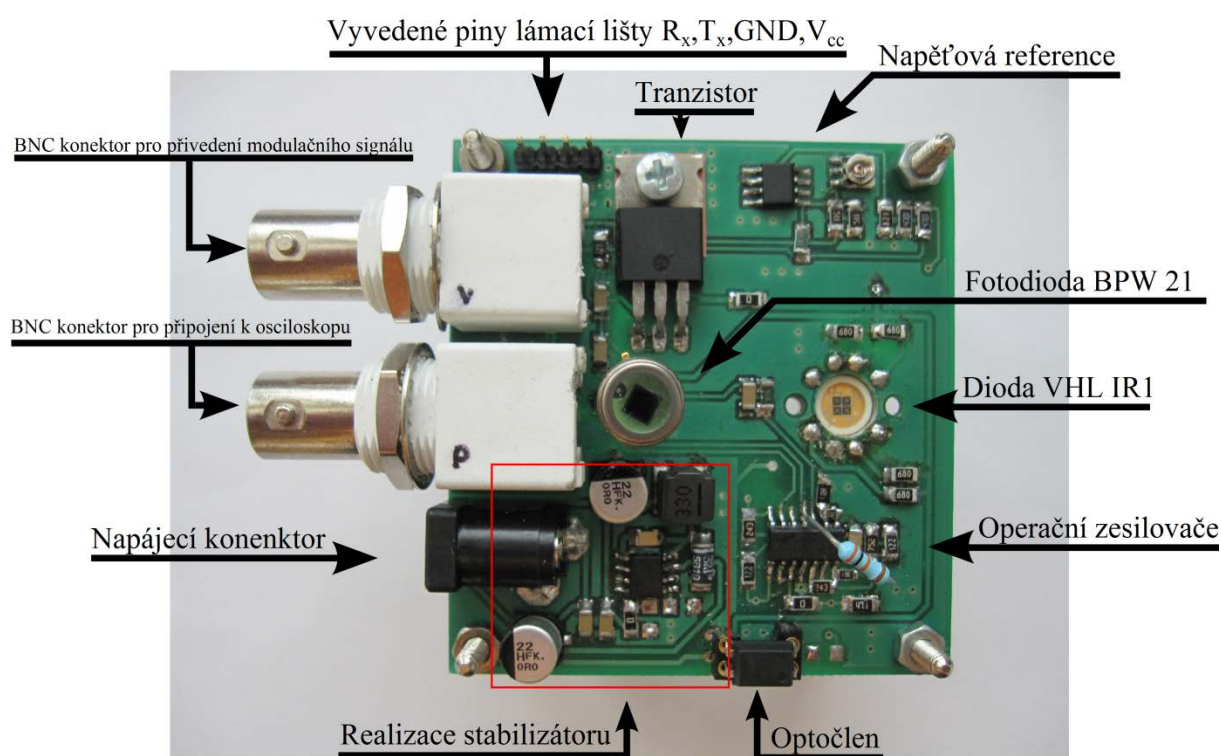
Jak je patrné z tohoto obrázku, na spodní straně DPS se nevyskytují žádné jiné součástky kromě LED diody a fotodiody. Sebekriticky musím podotknout, že při návrhu spodní strany jsem opomenul rušivý vliv cívky použité ve stabilizátoru na svrchní straně a ve spodní straně jsem pod touto cívku vedl vodiče spojující komponenty detektoru. Proto se na výstupu přijímače objevuje signál rušený. V druhé verzi navrhované desky již bylo vše opraveno. Následující obrázek ukazuje stropní modul, tak aby byl vidět profil komunikačních diod.



Obr. 5-3 Stropní jednotka

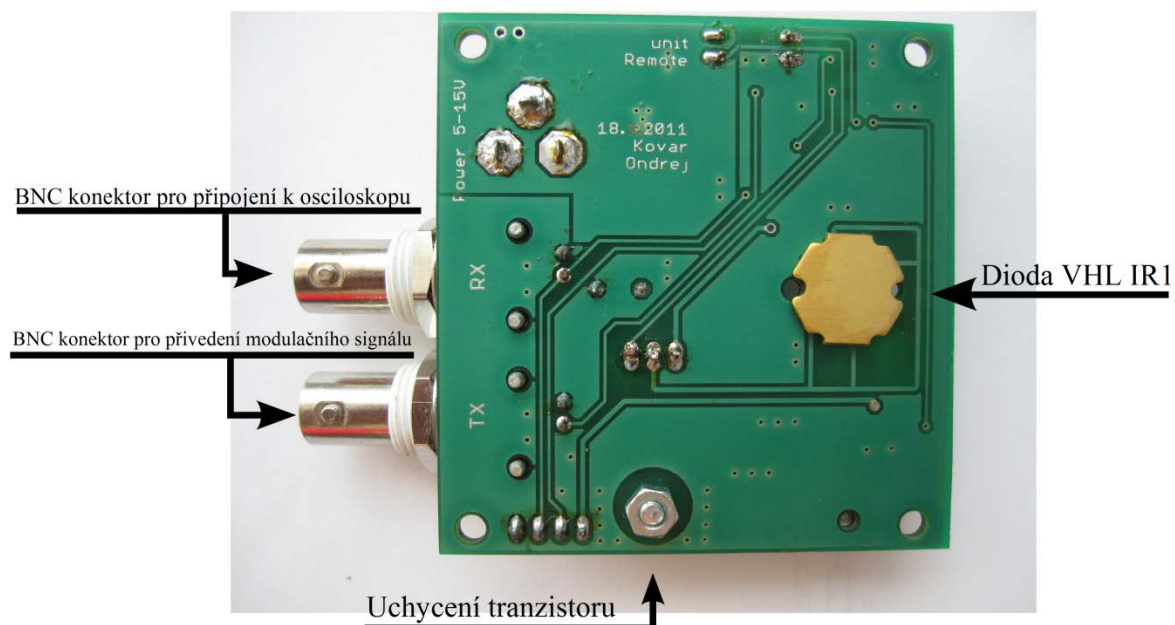
5.3 Mobilní (Uživatelská) jednotka

Plocha uživatelské jednotky bude v tomto případě o 14cm² větší. Velikost je 6,5x6 cm a to z toho důvodu, že jak fotodioda, tak vysílací LED dioda jdou umístěny na stejné straně jako ostatní komponenty tedy ve vrstvě TOP. Původně bylo zamýšleno obě diody umístit opět na spodní stranu, ovšem testování infračervené diody ukázalo, že během provozu se značně zahřívá. Při proudu 700mA teplota diody bez přiloženého chladiče vzrostla na kritickou mez, schopnost desky plošných spojů tento ztrátový výkon odvést byla naprosto nedostatečná. I při proudu omezeném na 200mA na čip se dioda značně zahřívala a proto bylo rozhodnuto umístit diodu do spodní vrstvy ale takovým způsobem, aby emitovala skrze vyřezaný otvor v desce plošných spojů a přitom mohla být ze spodu chlazena přiloženým chladičem. Použitý chladič je sice velmi předimenzovaný, ale jde pouze o výrobní prototyp, tudíž se jeho rozměry v následných verzích budou měnit. Následující obrázek zobrazuje horní stranu DPS mobilní jednotky.



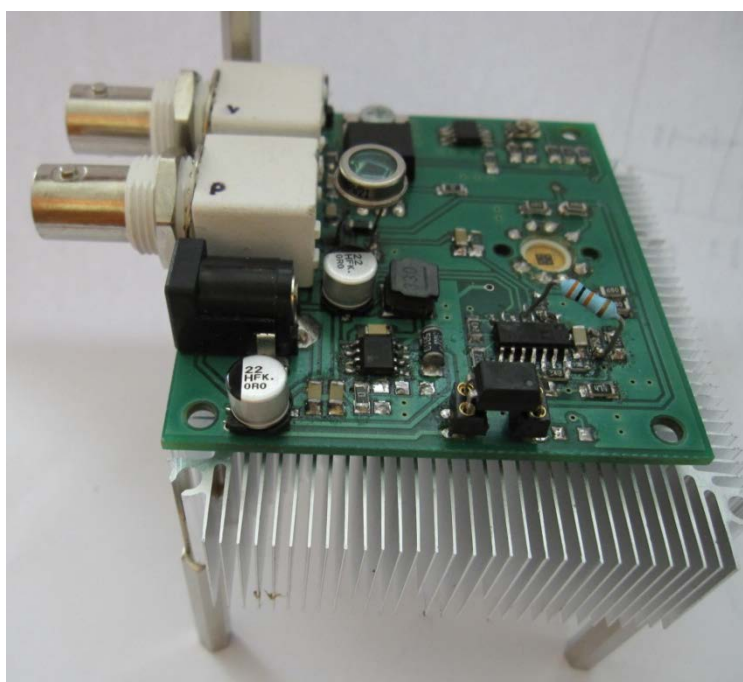
Obr. 5-4 Mobilní jednotka – vrchní část

Z obrázku lze pozorovat, že zvětšením plochy došlo k podstatně většímu rozptýlu komponent po desce. Stejně jako v předchozím případě, byly komponenty stabilizátoru seskládány do levého spodního rohu desky z důvodu eliminace rušení. Fotodioda je umístěna ve středu desky a LED dioda na pravém okraji. Způsob jakým je dioda VHL IR1 zapájená na desce, se po řadě testů jevil jako nejvhodnější i když může působit dosti kostrbatým dojmem. Na následujícím obrázku je zobrazena spodní strana DPS bez osazeného chladiče.



Obr. 5-5 Mobilní jednotka – spodní část

Z tohoto pohledu na spodní stranu mobilní jednotky lze pozorovat, že byly brány ohledy na vedení vodivých cest v závislosti na rozložení komponent, jež mohou působit rušení. Největším zdrojem rušivých signálů je v tomto schématu dozajista tlumivka o indukčnosti $33\mu\text{H}$. Poslední obrázek zachycuje kompletní mobilní jednotku postavenou na distančních sloupcích s připevněným provizorním chladičem.

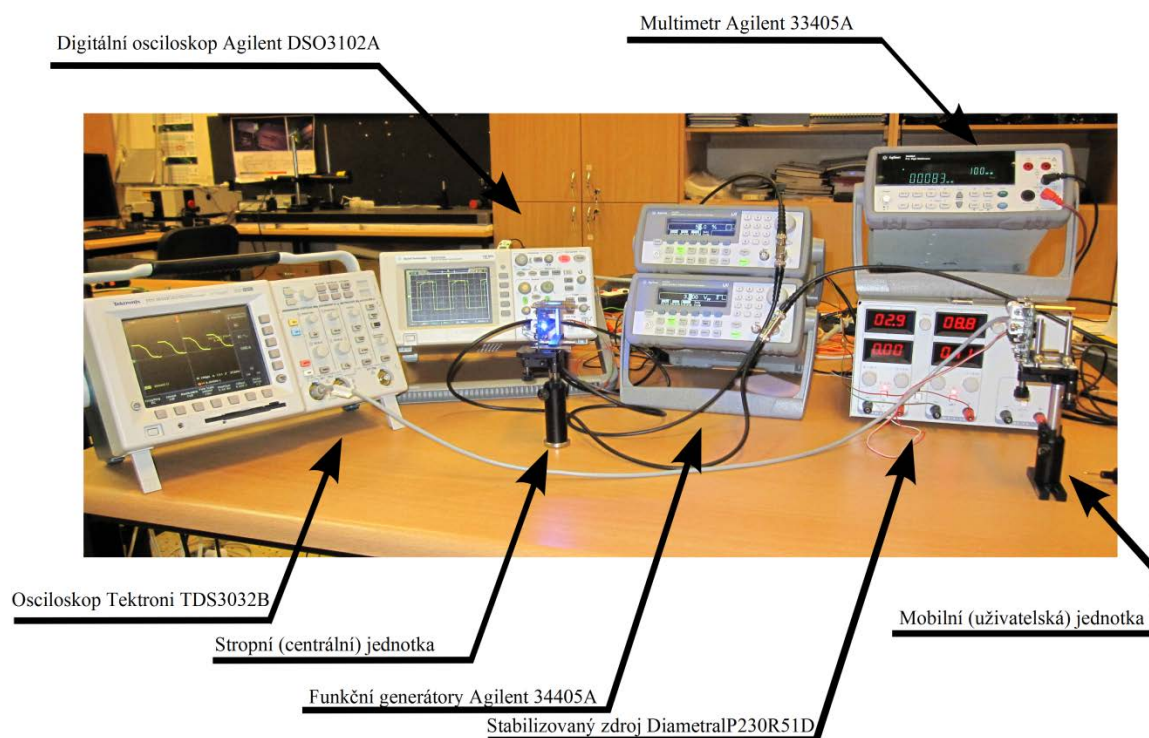


Obr. 5-6 Mobilní jednotka s chladičem

Chladič je přichycen k DPS na dvou místech tak aby přiléhal co nejtěsněji k diodě. Pro zlepšení vedení tepla byla použita i teplovodná pasta. Tímto končí kapitola představující zhotovené moduly a následuje kapitola poslední zabývající se jejich testováním.

6 Testování navrhnutého optického spoje

Veškeré testování proběhlo ve školní laboratoři za použití nejmodernějších a nejpreciznějších měřících přístrojů, jež jsou pro studenty dostupné. Měřicí pracoviště je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 6-1 Měřicí pracoviště

Použité přístroje:

Stabilizovaný zdroj Diametral P230R51D
Multimetr Agilent 34405A
Funkční generátory Agilent 33220A
Měřák optického výkonu Ophir Vega
Osciloskop Agilent DSO312A
Osciloskop Tektronix TDS3032B

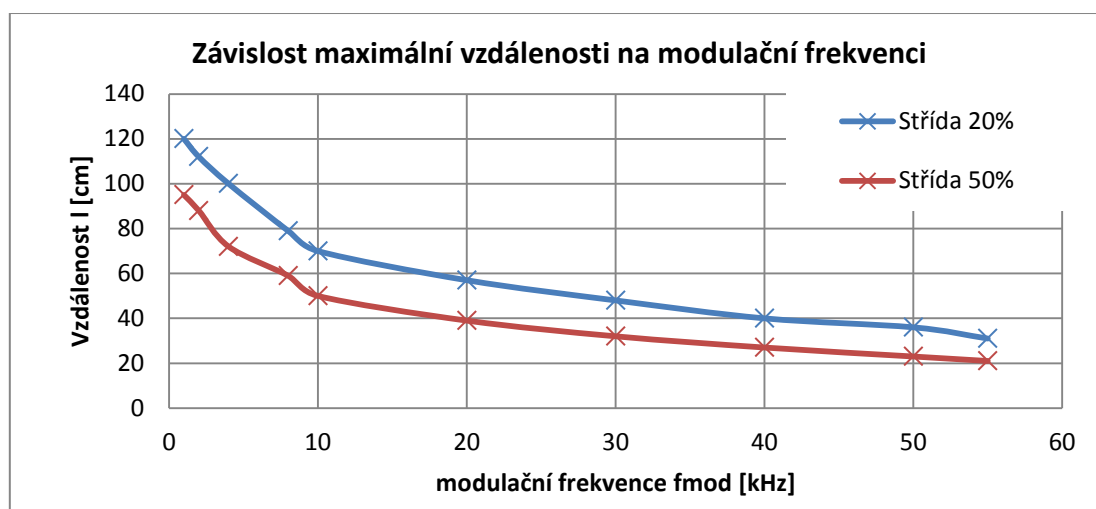
Prvním proměřovaným parametrem navrhnutého systému byla maximální přenosová vzdálenost. Měření byl zjištěn fakt, že nižší přenosovou vzdálenost bude mít za všech podmínek spoj realizovaný diodou LXHL PR03 a fotodiodou BPW21. Spoj v infračervené oblasti má podstatně lepší přenosové vlastnosti a proto bude proměřována pouze cesta realizovaná vlněním ve viditelném spektru.

6.1.1 Měření maximální komunikační vzdálenosti

Nejprve bude předmětem měření parametr nejdůležitější a to maximální použitelná komunikační vzdálenost. Měřit budeme na dvou různých hodnotách střídavy 20 a 50% a budeme měnit frekvenci v rozsahu od 1 kHz po maximální hodnotu, při které dojde již k takovému poklesu vyzařovaného výkonu diodou LHXL PR03, kdy bude přenosová vzdálenost menší než 20cm. Dle mého úsudku nemá smysl měřit při frekvenci 100kHz když bude reálná přenosová vzdálenost v řádu jednotek centimetrů. Podmínky měření byly následující. Modulační kmitočet $f_{MOD} = 4\text{kHz}$ obdélníkového tvaru o napětí $V_{P-P} = 5\text{V}$, střída signálu byla nastavena na 20% a offset nastaven na 2,5V.

f[kHz]	vzdálenost l [cm] střída 20%	vzdálenost l [cm] střída 50%
1	120	95
2	112	88
4	100	72
8	79	59
10	70	50
20	57	39
30	48	32
40	40	27
50	36	23
55	31	21

Tab. 6-1 Tabulka závislosti frekvence na maximálním dosahu



Obr. 6-2 Závislost maximální vzdálenosti na modulační frekvenci

Provedené měření ukázalo celkový potenciál navrhnutého přenosového systému. Jak je patrné největších přenosových vzdáleností dosahuje systém na nejnižších frekvencích s nejnižší střídou, což je ovšem pouhé potvrzení teorie. Důležitým poznatkem tohoto měření je, že maximální přenosová vzdálenost při frekvenci modulačního signálu $f_{MOD} = 1\text{KHz}$ je rovna 120cm. Což je na systém, v němž je použita ke komunikaci jen jedna dioda poměrně dobrý

výsledek hovořící o kvalitě návrhu. Modulační frekvence 1 kHz je však dosti nízká, a proto budeme brát spíše v potaz hodnotu 4kHz při níž spoj dosáhl maximální vzdálenosti 100cm.

6.2 Měření výkonu LED při modulaci

Další měření má za úkol, zjistit jaký je výkon dopadající na fotodiodu BPW 21 při plném výkonu diody a při modulaci obdélníkovým signálem o modulační frekvenci $f_{MOD}=4\text{kHz}$, střídě 50%, $V_{P-P} = 5\text{V}$ na vzdálenost 100 cm za 3 různých podmínek. Pro detekci optického výkonu byl použit přístroj Vega Ophir. Nakonec je nutné ještě změřený výkon přepočítat s ohledem na rozdíl detekčních ploch fotodiód.

Podmínky	Stav systému	Detekovaný výkon [μW]	Přepočet výkonu na plochu diody [μW]
zářivky	systém vypnut	42,3	2,961
	systém zapnut, bez modulace	53,5	3,745
	systém zapnut, modulace zapnuta	48,3	3,381
sluneční světlo	systém vypnut	654	45,78
	systém zapnut, bez modulace	664	46,48
	systém zapnut, modulace zapnuta	672	47,04
tma	systém vypnut	22	0,00154
	systém zapnut, bez modulace	15,4	1,078
	systém zapnut, modulace zapnuta	9,63	0,6741

Tab. 6-2 Tabulka detekovaného výkonu za různých podmínek

Tabulka nám ukazuje, jakou měrou je zastoupen výkon na vlnové délce 455nm u zářivek a u slunečního světla. Nejvíce výkonu dopadalo na fotodiodu při osvětlení slunečním zářením. Rozdíl mezi zářivkou a slunečním světlem je enormní, takřka 15x větší. Další věcí, kterou lze upozorovat je, že měřicí přístroj detekuje záření diody s vysokou citlivostí a pokud hodnotu naměřenou při slunečním světle budeme brát jako odchylku díky velkému rozsahu, můžeme říci, že za všech podmínek stejně.

6.3 Měření fázového posunu

Bylo ponecháno stejné nastavení jako v předchozím případě. Parametry modulačního signálu: Obdélníkový průběh a amplituda signálu $U = 5V_{P-P}$. Měření probíhalo při nastavení střidy na 20% a 50% při 3 různých modulačních frekvencích 4kHz, 10 kHz a 20 kHz. Z osciloskopu byl odečítán časový rozdíl mezi náběžnými hranami signálů a ten byl poté přepočten na fázový rozdíl ve stupních.

Pro frekvenci $f_{MOD} = 4kHz$

Střída 20%

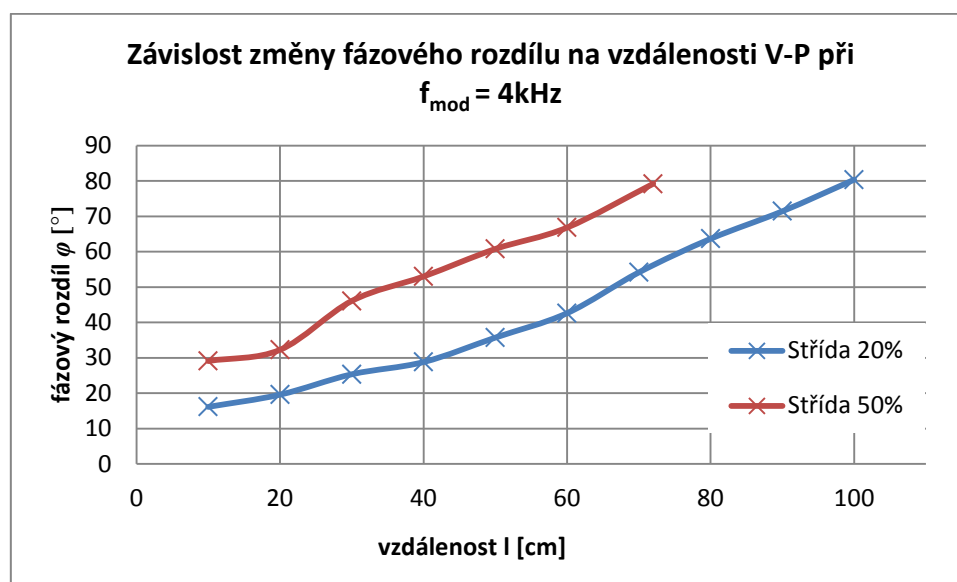
vzdálenost l [cm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
t [μs]	11,2	13,6	17,6	20	24,8	29,6	37,6	44,2	49,6	55,8
fázový rozdíl [°]	16,128	19,584	25,344	28,8	35,712	42,624	54,144	63,648	71,424	80,352

Tab. 6-3 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 4kHz střidu 20%

Střída 50%

vzdálenost l [cm]	10	20	30	40	50	60	72	80	90	100
t [μs]	20,2	22,4	32	36,8	42,2	46,4	55			
fázový rozdíl [°]	29,088	32,256	46,08	52,992	60,768	66,816	79,2			

Tab. 6-4 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 4kHz střidu 50%



Obr. 6-3 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{mod} = 4kHz$

Při modulační frekvenci 4kHz bylo dosaženo maximální komunikační vzdálenosti při střídě signálu 20%. Maximální vzdálenost potom byla 100cm a fázový rozdíl mezi vysílaným a přijímaným signálem byl 80,353°. Když došlo k přepnutí střidy na 50%, klesla tím i maximální přenosová vzdálenost o 28% ze 100cm na 72cm. Při tomto nastavení byl při maximální použitelné vzdálenosti fázový rozdíl roven 79,2°.

Pro frekvenci $f_{MOD} = 10\text{kHz}$

Střída 20%

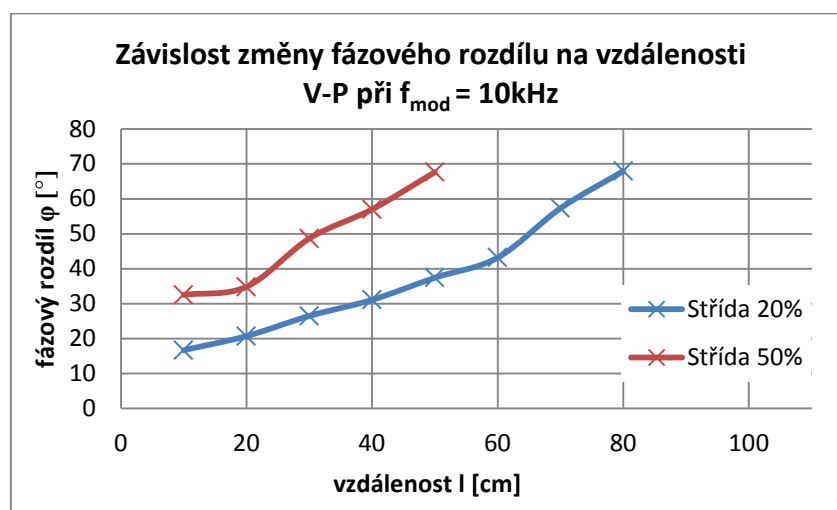
vzdálenost $l[\text{cm}]$	10	20	30	40	50	60	70	76
$t[\mu\text{s}]$	11,6	14,4	18,4	21,6	26	30	39,8	47,2
fázový rozdíl $[\circ]$	16,704	20,736	26,496	31,104	37,44	43,2	57,312	67,968

Tab. 6-5 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 10kHz střidu 20%

Střída 50%

vzdálenost $l[\text{cm}]$	10	20	30	40	48	60	70	76
$t[\mu\text{s}]$	22,6	24,2	33,8	39,6	47			
fázový rozdíl $[\circ]$	32,544	34,848	48,672	57,024	67,68			

Tab. 6-6 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 10kHz střidu 50%



Obr. 6-4 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{mod} = 10\text{kHz}$

V případě zvýšení modulační frekvence ze 4kHz na 10kHz dojde k poklesu maximální přenosové vzdálenosti při střídě 20% ze 100cm na 76cm. Při střídě 50% je zkrácení vzdálenosti ve stejném poměru jako při střídě 20% a to ze 72cm na 48cm. Velikost fázového rozdílu zůstává takřka konstatní. Při střídě 20% při maximální vzdálenosti byla velikost tohoto rozdílu rovna $67,968^\circ$ a při střídě 50% při maximální vzdálenosti zase $67,68^\circ$. Následuje poslední změna frekvence na 20kHz.

Pro frekvenci $f_{\text{MOD}} = 20\text{kHz}$

Střída 20%

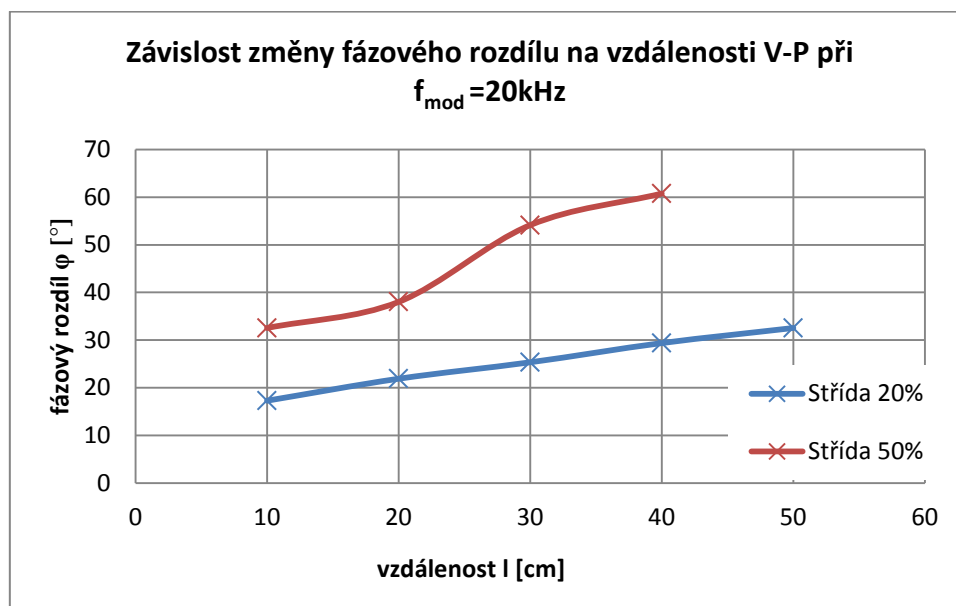
vzálenost $l[\text{cm}]$	10	20	30	40	44
$t[\mu\text{s}]$	12	15,2	17,6	20,4	22,6
fázový rozdíl $[\circ]$	17,28	21,888	25,344	29,376	32,544

Tab. 6-7 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 20kHz střidu 20%

Střída 50%

vzálenost $l[\text{cm}]$	10	20	30	39	44
$t[\mu\text{s}]$	22,6	26,4	37,6	42,2	
fázový rozdíl $[\circ]$	32,544	38,016	54,144	60,768	

Tab. 6-8 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 20kHz střidu 50%

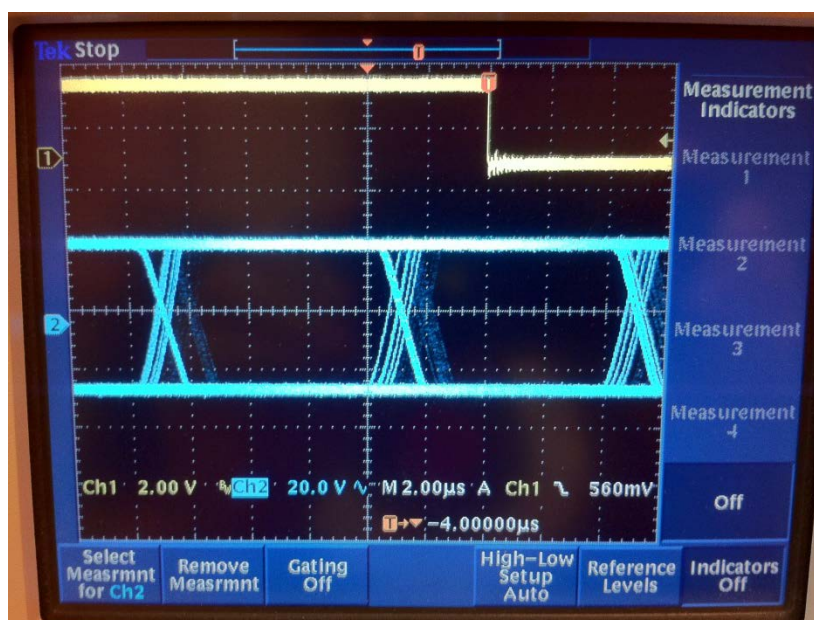


Obr. 6-5 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{\text{mod}} = 20\text{kHz}$

Maximální vzdálenost pro modulační frekvenci 20kHz se za použití signálové střidy 20% zmenšila oproti 4kHz ze 100cm na 44cm a při střídě signálu 50% z hodnoty 72cm na 39 cm. Z tohoto měření lze tedy vyvodit hned několik závěrů. Bylo zjištěno, že pro navržený systém není smysluplné modulovat signál příliš vysokými kmitočty. Ty totiž natolik sníží mezivrcholovou hodnotu výkonu LED diody LHHL PR03, že ani snížení střidy na nejmenší možnou hodnotu jakou generátor umožňoval, což je to na 20%, nezamezí prudkému snížení maximální přenosové vzdálenosti. Optimální frekvence pro přenos je v rozmezí 1-10kHz. Dále bylo dokázáno, že fázový rozdíl pro navržený spoj je při maximální naměřené vzdálenosti 100cm roven hodnotě $80,352^\circ$ a není nijak závislý na velikosti modulačního napětí, pouze na vzdálenosti což potvrzuje teoretické předpoklady.

6.4 Měření diagramu oka

Poslední měření realizované v rámci této diplomové práce, bylo zobrazení diagramu oka. Tento diagram je získán tak, že na první kanál osciloskopu byl přiveden signál z vysílací LED diody a na druhý kanál osciloskopu je přiveden výstup z přijímače. Postupným zvyšováním frekvence se na osciloskopu začne utvářet tento diagram. Základní parametry, které se u diagramu určují, jsou otevření oka a šířka oka. Otevření oka charakterizuje vzdálenost mezi úrovní $\log 1$ a $\log 0$. Čím je oko otevřenější, tím je pravděpodobnost záměny $\log 1$ a $\log 0$ menší. Vzdálenost mezi krajními polohami impulsů je šířka oka. Větší šířka dovoluje systému tolerantnější výběr místa, kde se provádí vzorkování aktuální binární hodnoty (střed oka). Chyba nastane, jestliže je oko prakticky zavřené, nebo je-li okamžik vzorkování posunut v důsledku fázového neklidu. Z diagramu oka je možné kvalitativně vyhodnotit některé rušivé vlivy, jako je IIF (intersymbol interference), jitter, proměnná rychlost šíření signálu kanálem, flukтуаční šum superponovaný na signál a podobně.



Obr. 6-6 Diagram oka

Měření tohoto průběhu však nebylo z hlediska dostupných přístrojů ideální a proto je výsledný diagram pouze orientační. Měření probíhalo na vzdálenost 80cm mezi vysílacím a přijímacím modulem a jak je patrné z pořízeného obrázku, oko je naprosto otevřené, čili pravděpodobnost záměny $\log 1$ za $\log 0$ je velmi malá. To dokládá dobrou funkčnost navržené optické komunikační linky.

7 Návrhy na zlepšení

Tato poslední kapitola je věnována návrhům, jakým způsobem by se dal navržený systém dále vylepšit. Jak jsem se mohl přesvědčit během laboratorních proměřování vyrobených modulů, diody a jejich fotodiody byly zvoleny vhodně. Nebyly zaznamenány žádné interference mezi komunikačními diodami a ani okolní záření nepřispívalo znatelným šumem. Pokud však byla fotodioda dána do bezprostřední blízkosti zářivek, byla fotodetekce takřka nemožná. Eliminace tohoto jevu patří k prvním návrhům na zlepšení systému. Bylo by vhodné u obou detekčních fotodiod použít speciální optické filtry. Takovéto filtry by zajistili potlačení záření na jiných vlnových délkách, než pro jaké jsou vyrobeny a tím by do velké míry eliminovaly negativní vlivy okolních rušení. Zabudování optických filtrů do tohoto systému bylo původně součástí návrhu, avšak díky extrémním cenám za výrobu jednoho specifického filtru především pro modrou barvu, bylo od tohoto nápadu upuštěno.



Obr. 7-1 Optické filtry [32]

Dalším vylepšením přicházejícím v úvahu je zabudování většího počtu vysílacích diod pro modrou oblast. Jak je psáno v kapitole týkající se výběru LED diod, nemá smysl řešit soustavu více výkonných prvků, jelikož by modré světlo bylo natolik silné, že by působilo nadměru rušivě. Proto by celá koncepce těchto modulu měla přejít od modrých diod k diodám emitujících bílé světlo. Soustava několika silných výkonných diod by sloužila v místnosti jako osvětlovací prvek, díky jejich většímu počtu by byl výkon dostatečný pro komunikaci na podstatně větší vzdálenosti i na vyšších kmitočtech a také by odpadl problém s rušivými vlastnostmi jiných osvětlovacích prvků. Možný by byl i návrh s emitory UV záření, Co se týče lepšího rozmístění komponent po desce plošných spojů, i tam by šlo udělat několik inovací. Prioritou by bylo posunutí veškerých vodivých cest co možná nejdále od stabilizační cívky, dále pak použití jiných BNC konektorů a v poslední řadě také zakomponování sériového komunikačního rozhraní. Pravdou je, že toto rozhraní mělo být už na zhotovené prototypní desce, ovšem opomnělo se na něj. To by bylo k vlastní konstruktivní kritice tohoto projektu, alespoň z mé strany vše.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou návrhu optického bezdrátového spoje malého dosahu, určeného pro provoz uvnitř budov. Cílem práce bylo navrhnout, simulovat, sestavit a proměřit takovýto systém. Oproti původnímu zadání byl spoj navržen pro oboustrannou komunikaci v pásmu viditelného světla pro jednu cestu a v infračervené oblasti pro druhý směr komunikace. Systém se skládá ze dvou jednotek, první z nich je nazvána jako centrální nebo též stropní. Je osazena pouhou jednou výkonovou diodou s označením LXHL PR03, která emituje záření na dominantní vlnové délce 455nm. Jako detekční prvek pro obousměrnou komunikaci je ještě na stropní jednotce fotodioda citlivá na infračervené záření na vlnové délce 850nm s označením SFH 206. Druhá jednotka, nazývaná jako uživatelská nebo též mobilní, má oproti první jmenované má DPS větší o 14cm². To je zapříčiněno nutností použití pasivního chladiče na spodní straně DPS a tudíž nemožnosti osazení této vrstvy součástkami, jak je tomu u centrální jednotky. Mobilní jednotka je osazena výkonovou čtyřčipovou IR diodou VHL IR1 emitující na vlnové délce 837nm a fotodiodou BPW 21 pro detekci vlnění v modrém spektru. Tento systém byl sestaven a testován v laboratorních podmínkách a je pouhým prototypem, kde nejde o překonávání rekordů v oblasti velmi vysokých komunikačních frekvencí či velkých komunikačních vzdáleností, jde pouze o to otestovat jeho limity a správnou funkci.

Testování funkce modulů bylo prováděno v několika krocích. Nejprve byl měřen maximální dosah spoje v závislosti na změnách frekvence a střídě modulačního signálu. Nejvyšší přenosové vzdálenosti 120cm, bylo při běžných pracovních podmínkách (zapnuté zářivky a vliv slunečního světla), dosaženo na frekvenci 1kHz a střídě signálu 20%. Druhým objektem testování byla maximální modulační frekvence, při které je spoj ještě funkční. Tato hodnota je 55kHz na vzdálenost 31cm. Další měření mělo za úkol určit velikost fázového rozdílu mezi vyslaným a přijímaným signálem. Nejvyšší hodnoty 80° bylo dosaženo na vzdálenosti 1m při frekvenci 4kHz. Poslední test spočíval v zobrazení diagramu oka. Na něm je patrné, že oko je velmi otevřené, což indikuje korektnost navrženého systému.

Všechny požadavky, které byly kladeny tuto diplomovou prací lze pokládat za splněné, jelikož navržené komunikační prototypy jsou funkční a pracují poměrně spolehlivě na vzdálenosti do 100cm a modulační frekvenci mezi 1 a 10kHz. Jak již bylo řečeno, jako věc navíc je v této práci myšleno i druhý směr komunikace v infračerveném spektru.

9 Seznam použité literatury a jiných zdrojů

- [1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham: SPIE, 1998.
- [2] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York: John Wiley, 1991.
- [3] SMITH, F. G., KING, T. A., WILKINS, D. *Optics and Photonics*. New York: John Wiley, 2007.
- [4] BOUCHET, Oliver, et al. *Free-space optics propagation and communication*. England : Wiley, 2006. 219 s.
- [5] DLR [online]. 2005 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/kommunikation/publikationen/116_nachrichten/Artikel_02_Kiodo.pdf>
- [6] CAPANINA [online]. 2005 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <http://www.capanina.org>
- [7] Skyrocket [online]. 2006 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: http://space.skyrocket.de/index_frame.htm?http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mto.htm
- [8] Czech Light [online]. 2000 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <http://czechlight.cesnet.cz/en/publications/free-space-optics.html>
- [9] M. Uysal , C. N. Georgiades, “On the Error Performance Analysis of Space-Time Trellis Codes”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, p. 1128-1133, July 2004.
- [10] RAMIREZ, R.; GREEN, R. J. Indoor Optical Wireless Communication. In *Indoor Optical Wireless Communication* [online]. 1998. [s.l.] : [s.n.], 1998 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://wsl.stanford.edu/~ee359/infrared.pdf>>.
- [11] CUI, Kaiyun, et al Indoor optical wireless communication by ultraviolet and visible light. In *Indoor optical wireless communication by ultraviolet and visible light* [online]. USA : [s.n.], 2004 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://www.ee.ucr.edu/~dxu/mypaper/conference/Xu_Cui_spie09.pdf>.
- [12] KAHN, JOSEPH M. ; BARRY, JOHN R. Wireless Infrared Communications. In *Wireless Infrared Communications* [online]. [s.l.] : [s.n.], 1997 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www-ee.stanford.edu/~jmk/pubs/proc.ieee.2.97.pdf>>.
- [13] VRBÍK, Petr Hygienická problematika ultrafialového záření. In *Hygienická problematika ultrafialového záření* [online]. Brno : [s.n.], 2010 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.4-construction.com/cz/clanek/hygienicka-problematika-ultrafialoveho-zareni/>>.

- [14] CARRUTHERS, Jerrey B. Wireless Infrared Communications. In *Wireless Infrared Communications* [online]. Boston : [s.n.], 2006 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-reprints/2002%20Carruthers%20%28Wiley%20Encyclopedia%29%20Wireless%20infrared%20communications.pdf>>.
- [15] JAMIESON, Isaac. *Bio Electromagnetic Research Initiative* [online]. 2009 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://bemri.org/visible-light-communication.html>>.
- [16] *Space.skyrocket.de* [online]. 2010 [cit. 2011-01-03]. Mars Telecommunications Orbite. Dostupné z WWW: <http://space.skyrocket.de/doc_sdat/mto.htm>.
- [17] *ESA.INT* [online]. 2004 [cit. 2011-01-03]. ESA.INT. Dostupné z WWW: <http://www.esa.int/esaCP/ESASGBZ84UC_index_1.html>.
- [18] Luxeon emitter. In *Luxeon emitter* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/511/511-995/dsh.511-995.1.pdf>.
- [19] Siemens photodiode . In *Siemens photodiode BPW 21* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/520/520-028/dsh.520-028.1.pdf>.
- [20] Power mossfet irfz44. In *Power mossfet irfz44* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/213/213-071/dsh.213-071.1.pdf>.
- [21] *Analogdevices.com* [online]. 2010 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.analog.com/en/amplifiers-and-comparators/precision-op-amps/ad8662/products/product.html>>.
- [22] PROGRAMMABLE VOLTAGE REFERENCE. In *PROGRAMMABLE VOLTAGE REFERENCE TLR431* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW:<http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-042/dsh.330-042.1.pdf>.
- [23] Optoclen BPC 817C. In *Optoclen BPC 817C* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/523/523-249/dsh.523-249.1.pdf>.
- [25] *Wikipedia* [online]. 2005 [cit. 2011-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>>.
- [26] *Www.itu.com* [online]. 2008 [cit. 2011-03-01]. Agency for information and communication technology. Dostupné z WWW: <www.itu.com>.
- [27] JONES, Victor. *People.seas.harvard.edu* [online]. 2005 [cit. 2011-05-19]. Optical Telegraphy. Dostupné z WWW: <<http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/images/history/chappe.html>>.
- [28] MORAVEC, Jan. *Www.itras.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-05-19]. ITRAS. Dostupné z WWW: www.itras.cz

- [29] *Science Clarified* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. The Development of Lasers . Dostupné z WWW: <<http://www.scienceclarified.com/scitech/Lasers/The-Development-of-Lasers.html>>.
- [30] WILFERR, Otakar. *Optoelektronika*. Brno : VUT, 2005. Vlastnosti Atmosféry, s. 153.
- [31] WILFERT, Otakar . Nové metody optických komunikací ve volném prostoru. In *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru* [online]. Brno : VUT, 2006 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf>.
- [32] *American institute of physics* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. The first lasers. Dostupné z WWW: <<http://www.aip.org/history/exhibits/laser/sections/raydevices.html>>.
- [33] *Microdesignum* [online]. 2008 [cit. 2011-05-19]. Polovodičové lasery a LEDky. Dostupné z WWW: <<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>.
- [34] *Wikipedia* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Photodiode. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>>.

10 Seznam tabulek

Tab. 2-1 Hodnoty napětí na diodě v propustném směru pro dané barvy [25].....	17
Tab. 2-2 Porovnání základních parametrů AVP a PIN fotodiod.....	21
Tab. 2-3 Tabulka znázorňující Zemské orbity s jejich výškami	23
Tab. 2-4 Chronologie výzkumu optické indoor komunikace v pásmu IR [14].....	30
Tab. 2-5 Porovnání RF a IČ metody pro bezdrátovou komunikaci [12].....	31
Tab. 2-6 IrDA Standarty pro datové přenosy [12]	31
Tab. 2-7 Bezpečnostní třídy [10].....	32
Tab. 2-8 Rozdělení UV spektra.....	33
Tab. 2-9 Závislost propustnosti skla na vlnové délce záření.....	33
Tab. 2-10 Porovnání útlumů pro zadané spektrální oblasti [12]	35
Tab. 3-1 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti.....	38
Tab. 3-2 Tabulka závislosti detekovaného výkonu na vzdálenosti	41
Tab. 7-1 Tabulka závislosti frekvence na maximálním dosahu	62
Tab. 7-2 Tabulka detekovaného výkonu za různých podmínek.....	63
Tab. 7-3 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 4kHz střidu 20%.....	64
Tab. 7-4 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 4kHz střidu 50%.....	64
Tab. 7-5 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 10kHz střidu 20%.....	65
Tab. 7-6 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 10Hz střidu 50%.....	65
Tab. 7-7 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 20kHz střidu 20%.....	66
Tab. 7-8 Tabulka závislosti fázového rozdílu na vzdálenosti pro 20kHz střidu 50%.....	66

11 Seznam zkratek

AEL	Allowable exposure limits	Povolená expoziční doba
APD	Avalanche photodiode	Lavinová fotodioda
APT	Acquisition, pointing and tracking systém	Zaměřovací systém
BER	Bit error rate	Poměr chybných bitů ku celku
DC	Direct current	Stejnoseměrný proud
EIC	International Elektrotechnical comission	Mezinárodní elektrotechnická komise
ESP	Electronical signal processing	Elektronické zpracování signálu
FSO	Free space optics	Optické bezdrátové spoje
GEO	Geostacionary Earth orbit	Geostacionární oběžná dráha
GPS	Global position systém	Navigační systém
HAP	High altitude platform	Plošina ve vysokých výškách
IR	Infrared	Infračervená
LED	Light emitting diode	Světlo emitující dioda
LD	Laser diode	Laserová dioda
LEO	Low Earth orbit	Nízká oběžná dráha
LOS	Line of sight	Přímá viditelnost
MEO	Medium Earth orbit	Střední oběžná dráha
NLOS	Non-line of sight	Nepřímá viditelnost
OBS		Optický bezdrátový spoj
PIN	PIN photodiode	Fotodioda typu PIN
OPS	Optical signal processing	Zpracování optického signálu
QOS	Quality of service	Kvalita služeb
RF	Radio frequency	Radiové frekvence
SNR	Signal to noise ratio	Poměr signálu ku šumu
UV	Ultraviolet	Ultrafialová
VLC	Visible light communication	Komunikace ve viditelném spektru

12 Seznam obrázků

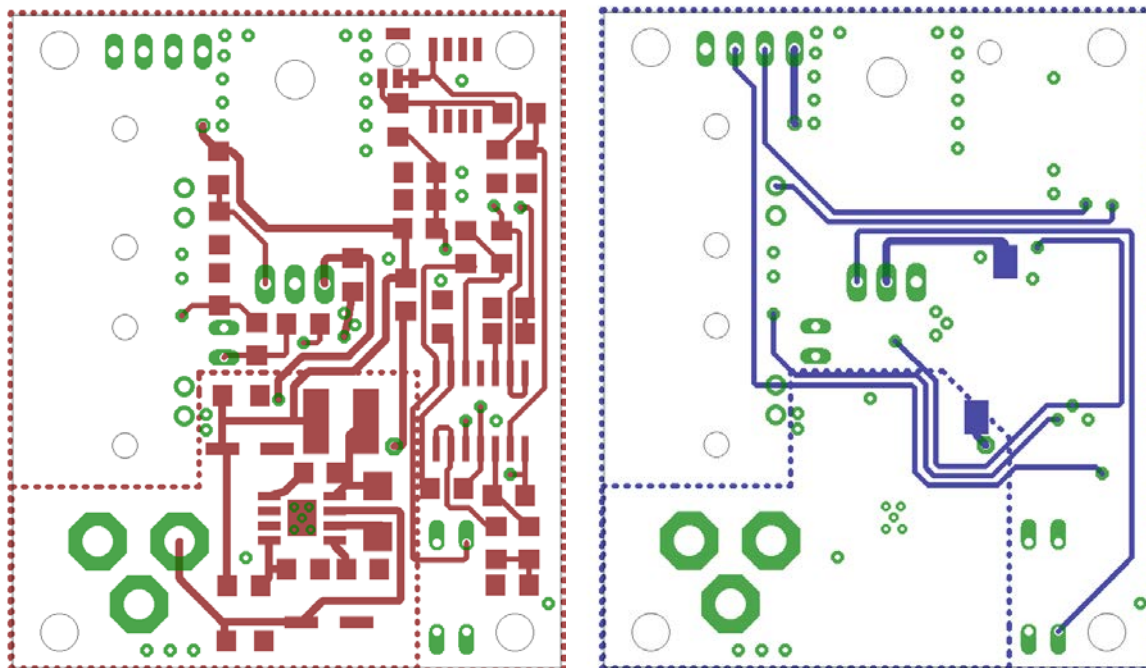
Obr. 2-1 Zapálení signalizačního ohně [24].....	2
Obr. 2-2 Realizace Chappého telegrafu, Louvre, Francie [27]	3
Obr. 2-3 Heliograf na Milešovce[28]	4
Obr. 2-4 Ilustrace A. G. Bella testujícího vysílací část optického telefonu [29]	5
Obr. 2-5 Grafické znázornění dělení OBS	6
Obr. 2-6 Grafické znázornění závislosti útlumu atmosféry na vlnové délce záření[30].....	7
Obr. 2-7 Hlavice pro atmosférický spoj. Vlevo vysílač, vpravo přijímač [31].....	7
Obr. 2-8 Schéma optické bezdrátové linky	8
Obr. 2-9 Schéma analogového systému	9
Obr. 2-10 Schéma digitálního systému	9
Obr. 2-11 Model energetické bilance	10
Obr. 2-12 Podrobnější graf energetické bilance	12
Obr. 2-13 Prototyp prvního laseru vynalezeného T. H. Maimem [32]	14
Obr. 2-14 Princip vybuzení elektronu, následná generace laserového svazku [30].....	15
Obr. 2-15 Výkonová LED společnosti Luxeon Emitter [18]	18
Obr. 2-16 Pohled na LED seshora, zepředu a její schématická značka [25].....	18
Obr. 2-17 Schématická značka fotodiody	19
Obr. 2-18 Voltampérová charakteristika fotodiody[18].....	19
Obr. 2-19 Příklady komerčně používaných fotodiód	21
Obr. 2-20 Obrázek znázorňující jednotlivé orbity Země [18].....	22
Obr. 2-21 Animace optické komunikace mezi družicemi ARTEMIS a SPOT-4 [17].....	23
Obr. 2-22 Animace komunikace družic ARTEMIS (GEO) a OICETS (LEO) [5]	24
Obr. 2-23 Princip fungování projektu CAPANINA [6]	25
Obr. 2-24 Princip experimentu KIDO [5]	26
Obr. 2-25 Komunikace pomocí optického svazku mezi družicí MTO a Zemí [16]	27
Obr. 2-26 Princip šíření optického svazku	28
Obr. 2-27 Principiální návrh použití optické bezdrátové sítě v budově [12]	29
Obr. 2-28 Ukázka propojení technologie WIMAX s VLC [11]	34
Obr. 2-29 Ilustrace použití VLC v kancelářských prostorech[11]	35
Obr. 3-1 Závislost citlivosti lidského oka na světlo[33]	36
Obr. 3-2 Responsivita křemíkových fotodiód	37
Obr. 3-3 Výkonová dioda LXHL-PR03[18]	38
Obr. 3-4 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti.....	38
Obr. 3-5 Závislost detekovaného výkonu na úhlu natočení	39
Obr. 3-6 Graf zobrazující dominantní vlnovou délku diody LXHL PR03	39
Obr. 3-7 Diody VHL IR1 [18].....	40
Obr. 3-8 Závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti u diody VHL IR1	41
Obr. 3-9 Závislost relativní intenzity na úhlu natočení VHL IR1	41
Obr. 3-10 Detekce dominantní vlnové diody VHL IR1	42
Obr. 3-11 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody ODD 470W	43
Obr. 3-12 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody BPW 21	44
Obr. 3-13 Závislost relativní intenzity na úhlu natočení BPW21	44
Obr. 3-14 Závislost responsivity na vlnové délce u fotodiody SFH 206K	45
Obr. 3-15 Závislost relativní intenzity na úhlu natočení	46
Obr. 3-16 Nalevo fotodiody BPW 21, napravo fotodiody SFH 206K	46
Obr. 4-1 Schéma stabilizátoru	47
Obr. 4-2 Schéma centrální jednotky - vysílač	48

Obr. 4-3 Schéma komparátoru s hysterezí	49
Obr. 4-4 Hysterezní křivka	49
Obr. 4-5 Schéma mobilní jednotky - vysílač.....	51
Obr. 4-6 Voltampérová charakteristika diody VHL IR1 [19]	52
Obr. 4-7 Schéma mobilní jednotky - přijímač.....	53
Obr. 4-8 Neinvertující operační zesilovač.....	53
Obr. 0-1 Schéma centrální jednotky - přijímač	55
Obr. 5-1 Centrální jednotka – vrchní část	57
Obr. 5-2 Centrální jednotka - spodní část	58
Obr. 5-3 Stropní jednotka.....	58
Obr. 5-4 Mobilní jednotka – vrchní část	59
Obr. 5-5 Mobilní jednotka – spodní část.....	60
Obr. 5-6 Mobilní jednotka s chladičem.....	60
Obr. 6-1 Měřicí pracoviště	61
Obr. 6-2 Závislost maximální vzdálenosti na modulační frekvenci.....	62
Obr. 6-3 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{mod} = 4\text{kHz}$	64
Obr. 6-4 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{mod} = 10\text{kHz}$	65
Obr. 6-5 Závislost změny fázového rozdílu na vzdálenosti V-P při $f_{mod} = 20\text{kHz}$	66
Obr. 6-6 Diagram oka.....	67
Obr. 7-1 Optické filtry [32]	68

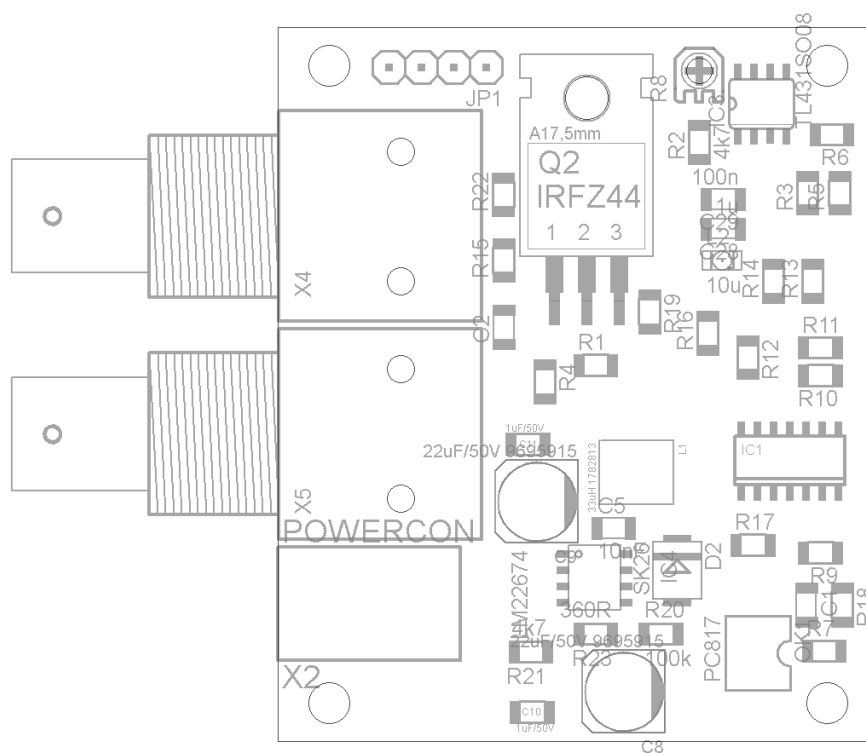
13 Seznam příloh

Příloha 1 Schéma stropního modulu – nalevo vrstva Top, napravo Bottom.....	77
Příloha 2 Osazovací plán stropního modulu	77
Příloha 3 Schéma mobilního modulu – nalevo vrstva Top, napravo Bottom	78
Příloha 4 Osazovací plán mobilního modulu	78
Příloha 5 Schéma vysílače stropní jednotky	79
Příloha 6 Schéma přijímače stropní jednotky	79
Příloha 7 Schéma vysílače mobilní jednotky	80
Příloha 8 Schéma přijímače stropní jednotky	80
Příloha 9 Experimentální testování výkonu diody VHL IR1	81
Příloha 10 Uspořádání pracoviště při finálním proměřování modulů.....	81

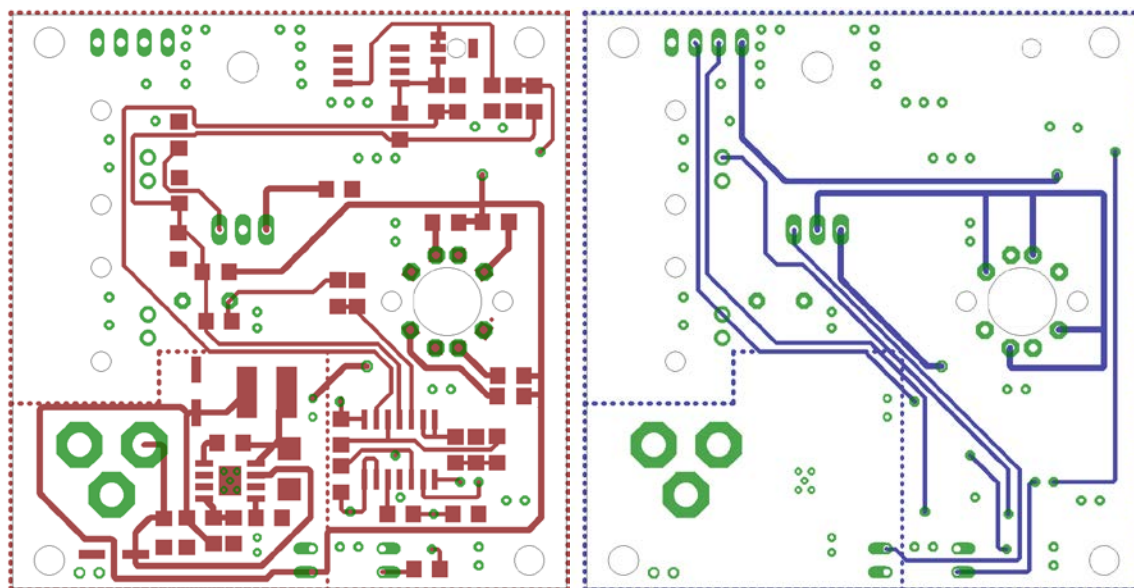
Přílohy



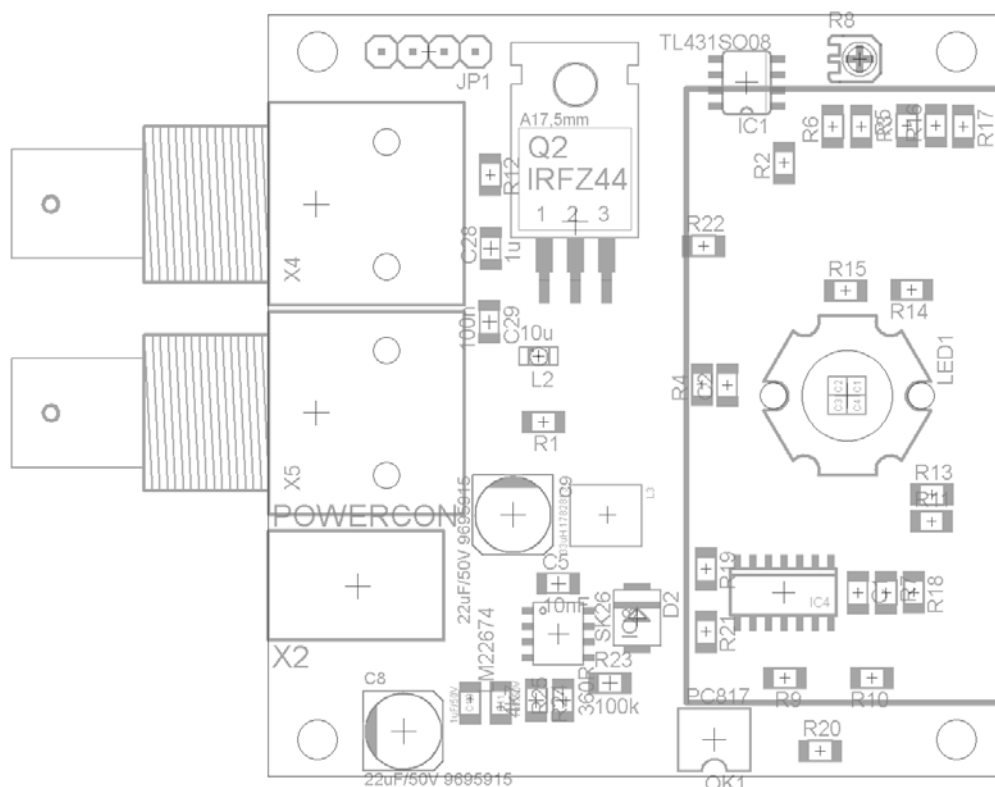
Příloha 1 Schéma stropního modulu – nalevo vrstva Top, napravo Bottom



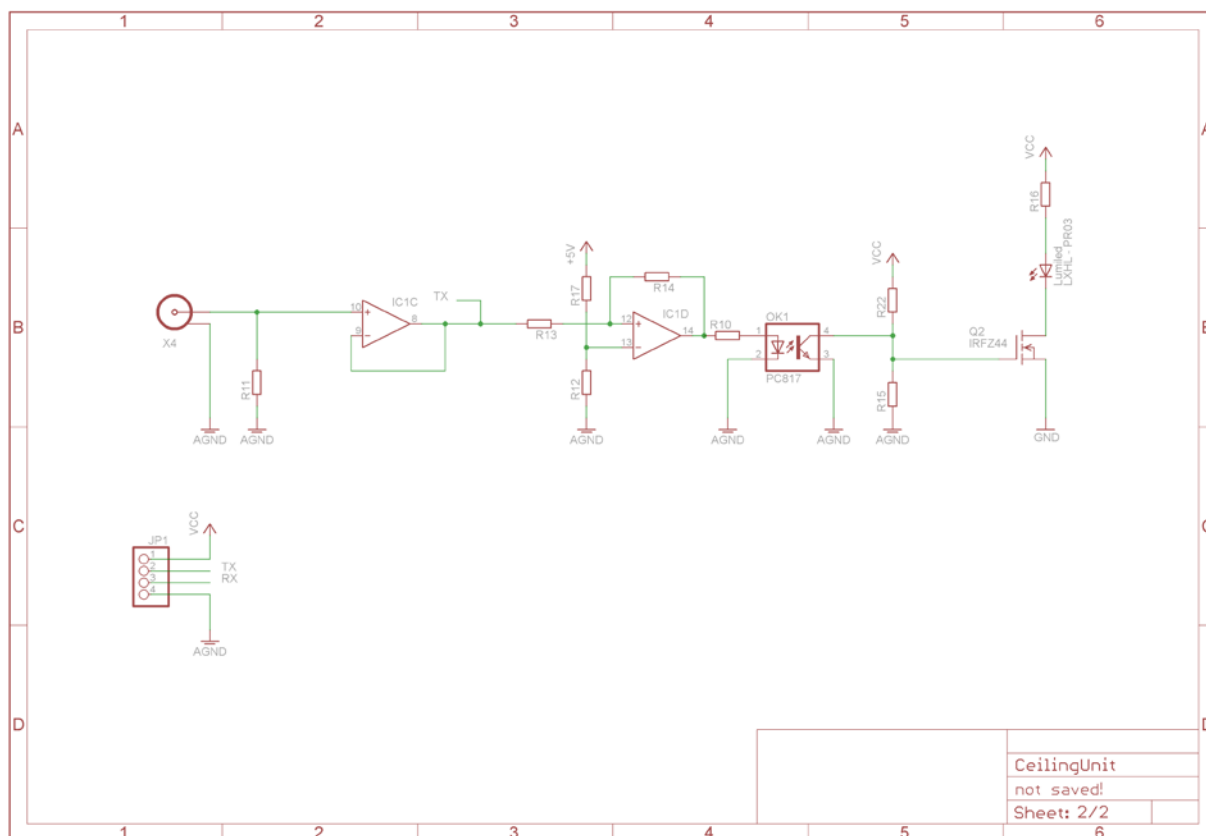
Příloha 2 Osazovací plán stropního modulu



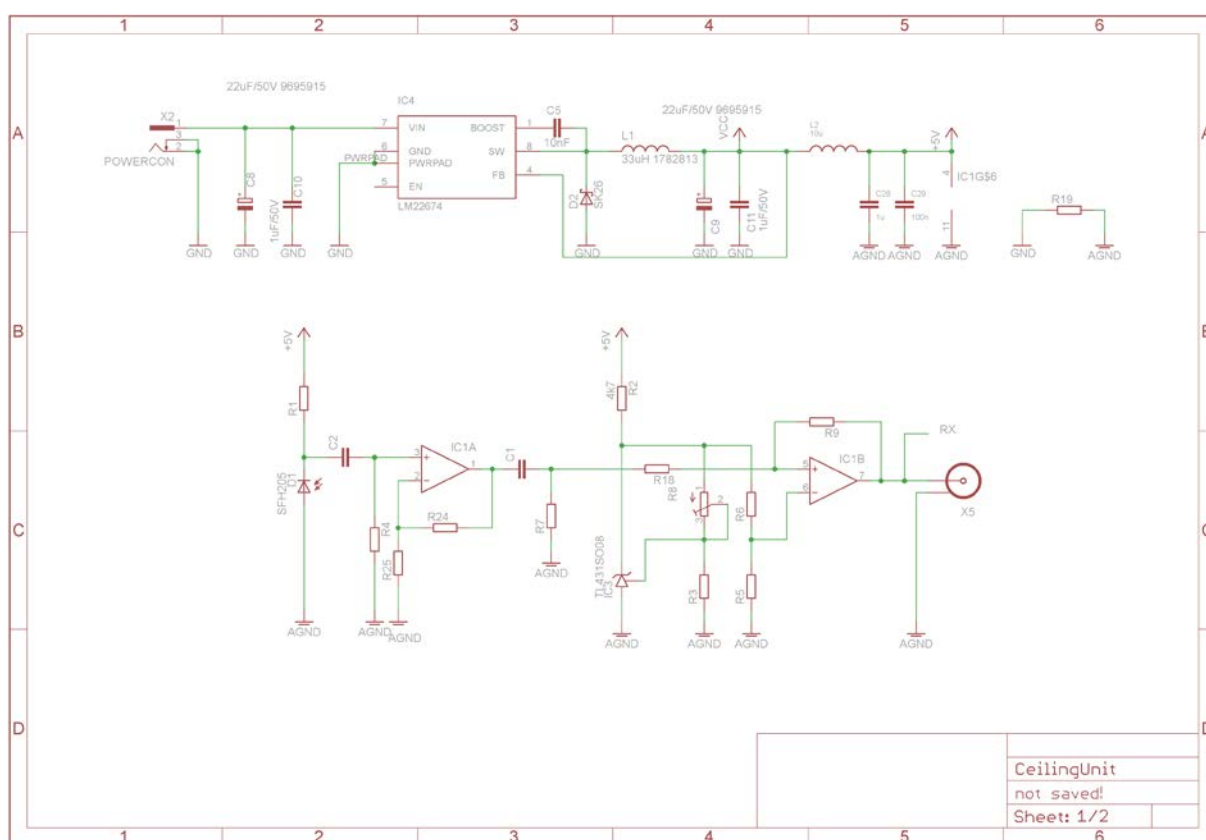
Příloha 3 Schéma mobilního modulu – nalevo vrstva Top, napravo Bottom



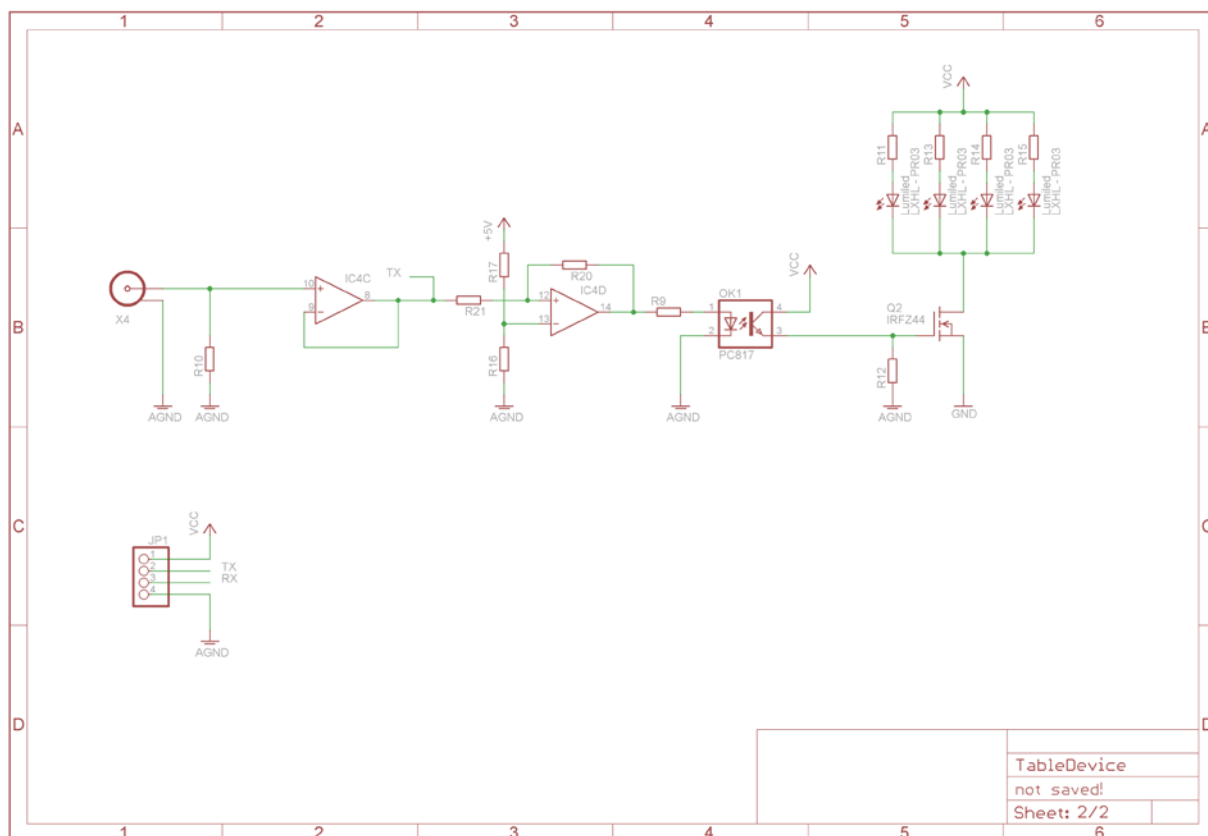
Příloha 4 Osazovací plán mobilního modulu



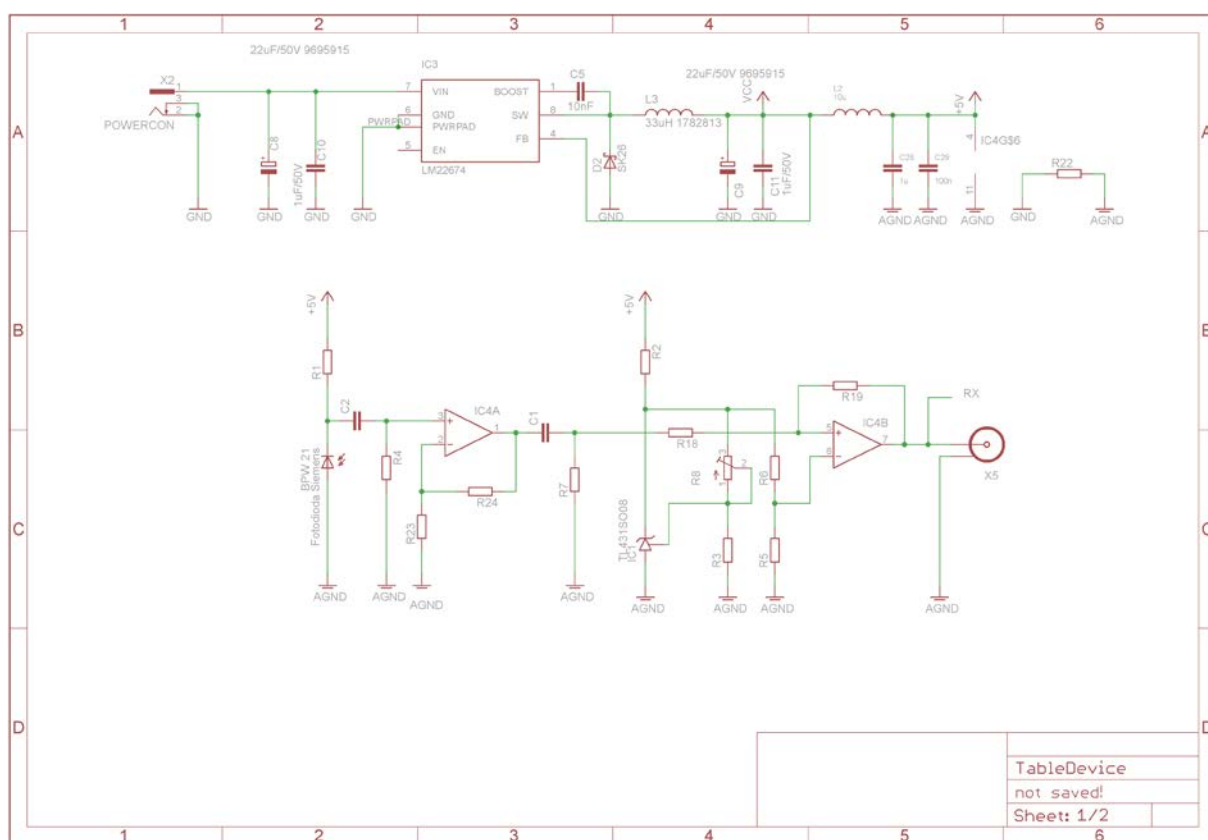
Příloha 5 Schéma vysílače stropní jednotky



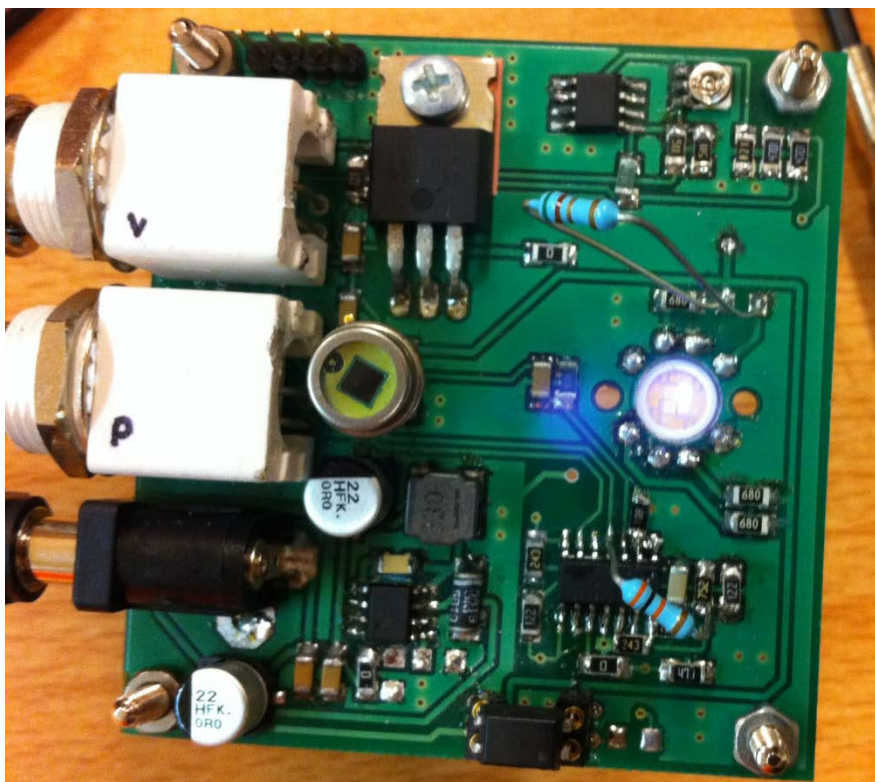
Příloha 6 Schéma přijímače stropní jednotky



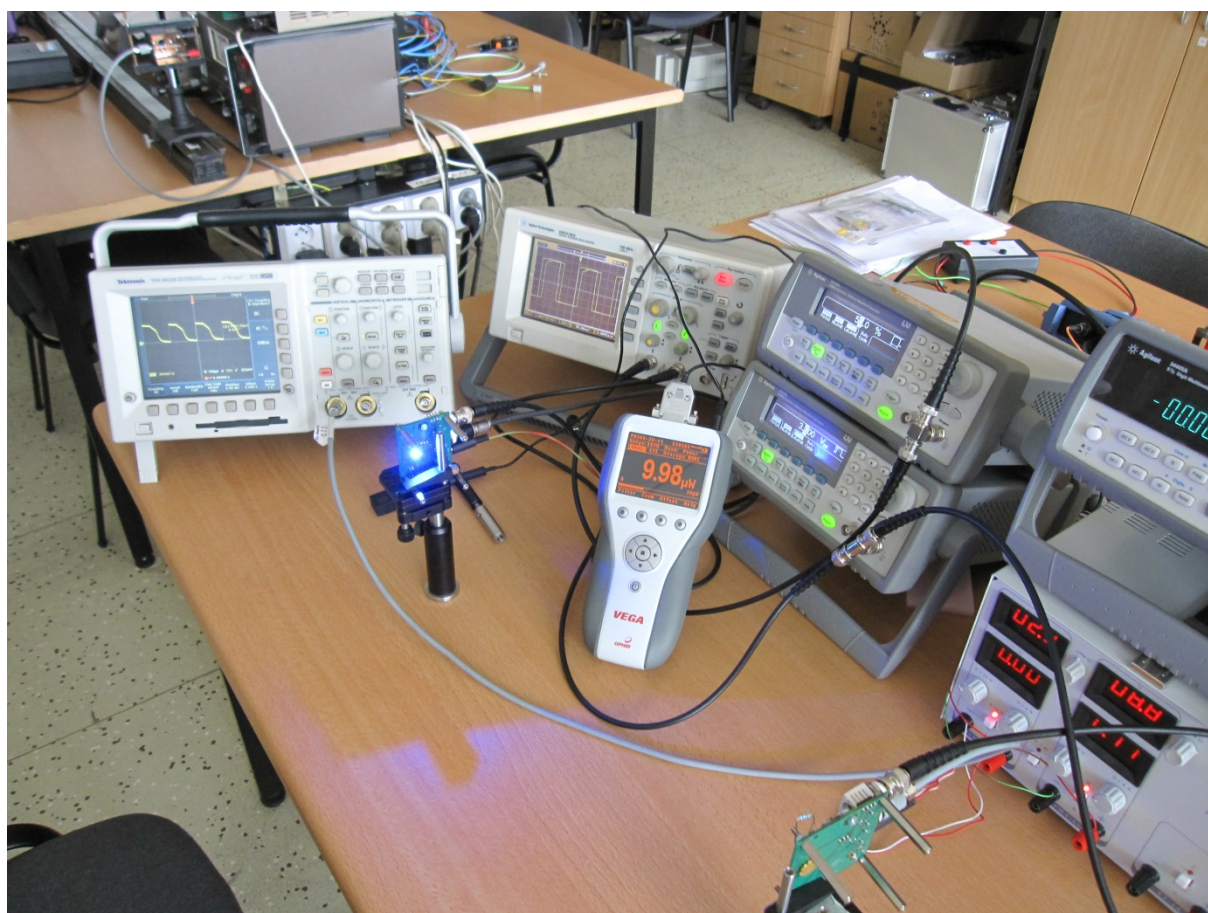
Příloha 7 Schéma vysílače mobilní jednotky



Příloha 8 Schéma přijímače stropní jednotky



Příloha 9 Experimentální testování výkonu diody VHL IR1



Příloha 10 Uspořádání pracoviště při finálním proměřování modulů